ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Martin Jankovič

Měření a zpracování nehodových dat pro účely soudního znalectví

Diplomová práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K622..... Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martin Jankovič

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Měření, zpracování a interpretace nehodových dat pro účely soudního znalectví**

Název tématu (anglicky): Measurement, Processing and Interpretation of Accident Data for Forensics

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Úvod do problematiky soudního znalectví v dopravě a provádění experimentů
- Popis referenčních měřicích zařízení
- Postup, příprava a průběh experimentu
- Zpracování a analýza datového výstupu
- Ověření a zhodnocení výsledku
- Závěr

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP v textu nebo v příloze

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury:

VLK, František, Dynamika motorových vozidel /. vyd 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s.

FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů : přiručka

ŠACHL, Jindřich. Analýza nehod v silničním provozu. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 144s

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Nouzovský, Ph.D.**
Ing. Eduard Kolla, PhD.

Datum zadání diplomové práce: **10. června 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní
L. S.

doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu soudního znalectví v dopravě

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

- Bc. Martin Jankovič -
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 10. června 2019

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Luboši Nouzovskému za odborné vedení, trpělivost, ochotu a přátelskou atmosféru při konzultaci a tvorbě této práce. Dále pak celému Ústavu soudního znalectví v dopravě FD ČVUT za kvalitní zázemí a možnosti podílení se na projektech vedoucí k získaní inspirace a vědomostí pro vytvoření této práce. A zejména také děkuji rodině za psychickou i materiální podporu, bez které bych se při svém studiu jen těžko obešel.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č.1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací."

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Ostravě dne 30.7.2020 .....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ NEHODOVÝCH DAT PRO ÚČELY SOUDNÍHO ZNALECTVÍ

Diplomová práce

2020

Martin Jankovič

ABSTRAKT:

Předmětem této diplomové práce je v její teoretické části seznámení s problematikou soudního znalectví v dopravě, vysvětlení jejích základních principů, metod a návazností na využiti elektronických nehodových dat. Praktická část této práce se pak zabývá přípravami, průběhem a vyhodnocením několika nárazových testů s cílem ověření užitečnosti a spolehlivosti elektronických nehodových pro analýzu dopravních nehod.

KLÍČOVÁ SLOVA: nárazové zkoušky, nehodová data, EDR

ABSTRACT:

The subject of this diploma thesis is in it's theoretical part acquaintance with the issue of forensic expertise in transportation, explanation of their basic principles, methods and connections to the use of electronic accident data. The practical part of this work then deals with the course, preparation and evaluation of several impact tests in order to verify the usefulness and reliability of electronic accidents for the analysis of traffic accidents.

KEY WORDS: crashtest, accident data, EDR

Obsah

1 Úvod 11

2 Problematika soudního inženýrství v dopravě 13

2.1 Definice soudního inženýrství 13

2.2 Soudní znalectví v dopravě 14

2.3 Základní fyzikální veličiny a zákony využívané při soudním znalectví v dopravě 16

2.3.1 Rychlost, dráha a čas 16

2.3.2 Zákon zachování hybnosti 19

2.3.3 Práce a energie 19

2.3.4 Síla, hmotnost, akcelerace 20

2.4 Provádění nárazových zkoušek 21

2.5 Metody zjišťování nárazové rychlosti z deformace vozidla 22

2.5.1 Zjednodušená metoda 23

2.5.2 Campbellova (základní) metoda 23

2.5.3 McHenryho metoda 23

2.5.4 Metoda CRASH3 23

2.5.5 Metoda využívaná v softwaru PC – Crash 24

2.5.6 Srovnání metod 25

2.6 Základní typy nárazových zkoušek pro testování pasivní bezpečnosti vybraných společností 26

2.6.1 Přední náraz 26

2.6.2 Boční náraz 30

2.7 Elektronická nehodová data pro účely soudního znalectví a jejich analýza na základě experimentů 31

2.7.1 Event data recorder a Crash data retrieval 31

2.7.2 Verifikace a validace systémů EDR s CDR na základě experimentů 33

2.7.3 Návaznost na předmětnou práci 35

2.7.4 Nezbytnost elektronických nehodových dat pro analýzu nehod v současné době 35

3 Experiment – praktická část 37

3.1 Itinerář nárazových testů 37

3.2 Kritéria výběru vozidel 37

3.3 Použitá technická aparatura 38

3.4 Referenční měřící zařízení 38

3.5 Testovací vozidla 42

3.5.1 Toyota Aygo 43

3.5.2 Toyota Auris 44

3.5.3 Dodge Caliber 45

3.5.4 Volvo V60 46

3.6 Nárazové zkoušky 47

3.6.1 Test 1 47

3.6.2 Test 2 49

3.6.3 Test 3 51

3.6.4 Test 4 52

4 Zpracování datového výstupu 54

5 Analýza průběhů zrychlení při jednotlivých testech 58

5.1 Test 1 58

5.2 Test 2 59

5.2.1 Průběh zrychlení vozidla Auris 59

5.2.2 Průběh zrychlení vozidla Aygo 60

5.3 Test 3 61

5.3.1 Průběh zrychlení vozidla Dodge 61

5.3.2 Průběh zrychlení vozidla Aygo 63

5.4 Test 4 64

5.4.1 Průběh zrychlení Volvo V60 64

5.4.2 Průběh zrychlení Toyota Auris 65

6 Ověření a zhodnocení výsledků v prostředí softwaru Virtual Crash 66

6.1 Základní poznatky o programu Virtual Crash 66

6.1 Základní nástroje a formy výstupu programu Virtual CRASH 67

6.1.1 Kinematické parametry vozidel 67

6.1.2 Dynamické parametry vozidel 67

6.2 Popis jednotlivých simulací a jejich výsledků 69

6.2.1 Test 2 – postup tvorby simulace 69

6.2.2 Test 2 - pohyb vozidel do konečných poloh 72

6.2.3 Srovnání průběhu rychlostí vozidel test 2 76

6.2.4 Komentář k výsledkům simulace testu 2 77

6.2.5 Test 3 – postup tvorby simulace 77

6.2.6 Srovnání rychlostí vozidel – test 3 80

6.2.7 Komentář k výsledku simulace testu 3 81

7 Závěr 82

8 Zdroje 84

Seznam použitých zkratek

CDR – Crash data retrieval

EDR – Event data recorder

EES – Energy equivalent speed

1 Úvod

Soudní inženýrství či soudní znalectví v dopravě je obor zabývající se zejména analýzou dopravních nehod, popisem jejich vzniku a děje, případně jejich rekonstrukcí. K tomu se využívá řada prostředků, technologií a metod. Lze je obecně rozdělit dle časové posloupnosti činností na proces sběru dat na místě nehodové události, poté samotnou analýzu a na závěr interpretaci pro danou osobu či institut. V teoretické části této práce bude šířeji popsán smysl a definice tohoto oboru. V jednoduchosti budou popsány základní fyzikální principy, jichž soudně znalecká analýza v dopravě využívá. To jsou zejména zákony kinematiky a dynamiky, tedy výpočty zahrnující veličiny jako hybnost, dráhu, rychlost, zrychlení, hmotnost a čas.

Ve svém jádru se teoretická část dostává k provádění nárazových testů, které nejsou jen k užitku automobilovým a homologačním společnostem pro vývoj pasivní bezpečnosti, ale také slouží jako zdroj dat mimo jiné pro tvorbu databází za účelem empirického odvozování nárazové rychlosti z deformací vozidla (tzv. metoda EES) jako vstupní veličiny pro analýzu nehod. Vedlejší aktivitou soudního inženýrství v dopravě je proto také provádění těchto experimentů, avšak na rozdíl od testů normovaných zde s různými scénáři nehodového děje a nárazovými parametry. Tato kapitola pak vyústí k představení výzkumů týkajících se alternativních možností získávání dat ohledně předstřetového a postřetového pohybu vozidla, vyčítáním ze systému EDR pomocí zařízení CDR. Technologie EDR je součástí řídicí jednotky airbagů a využívá tak mj. systém pro detekci kritického zrychlení, ale může také sloužit jako potencionálně vhodný zdroj pro analýzu průběhu nehody. Poskytuje celou řadu aktuálních hodnot dynamických i systémových veličin. Mezi nimi např. změny rychlosti v čase právě v okamžicích těsně před nárazem a těsně po nárazu s obvyklou délkou záznamu v řádech několika sekund a se vzorkováním v řádech desítek milisekund. Tato možnost skrývá velký potenciál v oblasti analýzy nehod i z hlediska budoucího vývoje legislativy autonomních vozidel. Ovšem kvůli zodpovědnosti, se kterou je soudně znalecká činnost nutně spjata, je třeba důkladně prověřit spolehlivost a funkčnost těchto systémů.

Od tohoto se pak odráží praktická část předmětné práce, jejíž náplní bude provedení několika nárazových zkoušek vozidel vybavených systémem EDR za účelem validace a verifikace tohoto systému a zařízení CDR používaného ke čtení těchto dat. Součástí práce je veškerá příprava experimentu včetně volby a charakteristiky referenčního zařízení sloužícímu k měření veličin srovnávaných s daty poskytovaných EDR a CDR. Dále se věnuje popisu testovaných vozidel, scénářům jednotlivých testů a podmínkám prostředí v jakém byly uskutečněny.

Další z kapitol se věnuje zpracování dat naměřených referenčním zařízením a dat z vozidel vyčtených zařízením CDR při těchto nárazových testech. Detailně popisuje jednotlivé metody a postupy, které byly aplikovány tak, aby ve finále mohlo dojít ke komparaci těchto dvou zdrojů a následné analýze a posouzení věrohodnosti a spolehlivosti záznamových zařízení vozidel pomocí grafického průběhu veličin v čase.

Mimo to však budou pro účely srovnání využity také záznamy z rychlokamer, které budou dány do kontrastu se záznamy ze simulačního programu, ve kterém bude vymodelován uskutečněný střet na základě průběhu kinematických veličin získaných ze záznamníku EDR. V závěru se pak zhodnotí míra spolehlivosti a užitečnosti těchto nehodových dat pro účely soudního znalectví v dopravě.

2 Problematika soudního inženýrství v dopravě

2.1 Definice soudního inženýrství

Soudní inženýrství neboli také forenzní inženýrství je aplikace inženýrských principů a metodik k zodpovězení faktických otázek. Tyto otázky jsou ve skutečnosti obvykle spojené s nehodami, trestnými činy, katastrofickými událostmi, degradací majetku a různými typy poruch. Zpočátku procesu je znám pouze konečný výsledek. Může se jednat o vyhořelý dům, poškozené strojní zařízení, zhroucenou konstrukci, či zdeformované vozidlo. Od tohoto bodu forenzní inženýr shromažďuje důkazy, za účelem zjištění, jakým způsobem došlo k selhání. Stejně jako dobrý novinář se i forenzní inženýr snaží zjistit, odpovědi na základní otázky: kdo, co, kde, kdy, proč a jak? Bylo při konkrétní poruše uskutečněno. Dá se tedy konstatovat, že se selhání snaží jistý způsobem zrekonstruovat. [1]

S pojmem soudní či forenzní inženýrství je také spjaté slovní spojení soudní znalectví. Soudní znalectví, jako takové lze označit za službu, kterou specialisté z konkrétních oborů (soudní inženýři, ale ovšem také soudní lékaři apod.) napomáhají zejména orgánům veřejné moci (tzn. soudům, policii, či úředníkům státní správy) při jejich rozhodovací činnosti v případech, kdy kvalifikace těchto orgánů nedosahuje potřebných vědomostí pro objektivní posouzení dané věci. Tuto službu znalci pak rovněž poskytují také fyzickým či právnickým osobám pro potřeby jejich právních či jiných jednání. [2]

K vytvoření spolehlivého základu pro analýzu se forenzní inženýr opírá většinou o osvědčené vědecké zásady a skutečné fyzické důkazy nalezené na místě vzniku daného problému a vztahující se k ověřitelným skutečnostem. Poté aplikuje uznávané vědecké metodologie a zásady k interpretaci fyzických důkazů a faktů. Analýza často vyžaduje simultánní aplikace několika vědeckých disciplín. V tomto ohledu je praxe forenzního inženýrství vysoce interdisciplinární. Rovněž je potřebná znalost kodexů, standardů a obvyklých pracovních postupů.

V zásadě do kompetence soudního inženýra spadá:

- vyhodnocování děje před událostí a stav, ve kterém se participované objekty nacházely před vznikem událostí.
- posuzuje, jaká událost se uskutečnila
- předpokládá věrohodné způsoby souvislostí stavu před a po události
- hledá důkazy, které různě popírají či podporují určité hypotézy
- aplikuje technické znalosti a dovednosti k propojení různých skutečností a důkazy do soudržného scénáře o tom, jak k události mohlo dojít. [1]

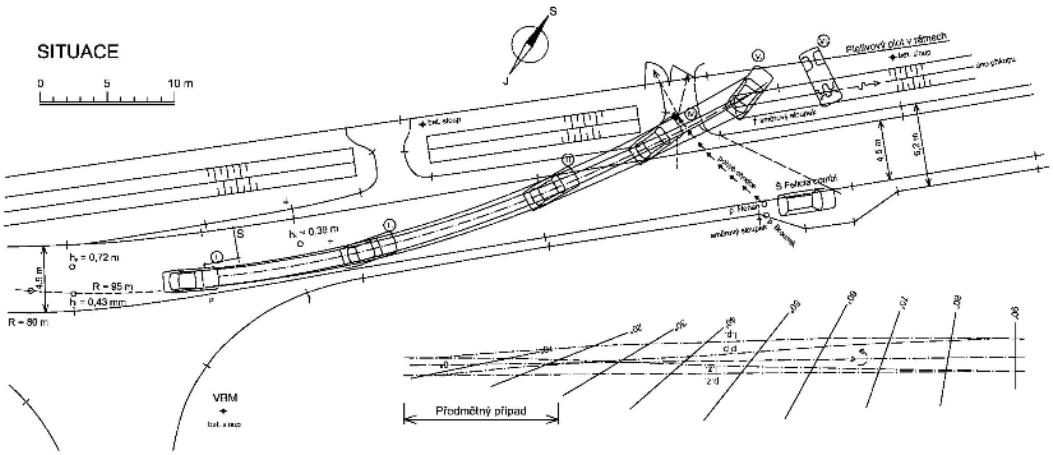
2.2 Soudní znalectví v dopravě

Automobilové nehody jsou jevem v dopravě velmi častým, a vedou tak k četným soudním sporům, týkajícím se například úhrady léčebných nákladů, škod na majetku či například nároků na invaliditu účastníků atd. Jejich analýza je spjata s pojmem rekonstrukce nehodového děje. Jedná se o obecný termín používaný k popisu uplatňování vědeckých principů a metodiky pro určení průběhu nehody. Mechanika nehody zahrnuje: rychlosti, směr jízdy, případná zpomalení nebo zrychlení zúčastněných vozidel, či sledy událostí před, při a po nehodě.

Rekonstrukce nehody je primárně založena na skutečných fyzikálních důkazech nalezených na místě činu nebo jinak přímo souvisejících s nehodou. Při analýze nehody se pak postupuje v souladu s vědeckými metodami. Obecně platí, že použití těchto vědeckých metod umožní přímé vypočítání různých parametrů, nebo alespoň stanoví horní a dolní meze jejich přijatelných hodnot.

Na zřetel se však berou také výroky a úvahy, nehody zúčastněných jedinců a svědků, často v nich mohou být totiž obsaženy důležité indicie, které se přímo či nepřímo vztahují k příčinám dané nehody. Řádná vědecká analýza by však měla být založena spíše na ověřitelných skutečnostech a zavedených přírodních zákonech, nežli na eventuálně zaujatém stanovisku zúčastněné strany.

Mezi nástroje sběru dat pro vyšetřování dopravních nehod patří zejména geodetická zařízení sloužící k měření konečných poloha a stop, dále pak fotodokumentace pro grafický záznam situace, ale i deformací vozidla, mezi progresivnější metody lze pak zařadit například leteckou fotogrammetrii. [2], [3], [4], [5]



Obrázek 1 - ukázka plánku nehody

Obrázek 2 - využití totální stanice pro polohovou dokumentaci nehod policisty

Obrázek 3 - tvorba 3D modelu pomocí letecké fotogrammetrie

2.3 Základní fyzikální veličiny a zákony využívané při soudním znalectví v dopravě

2.3.1 Rychlost, dráha a čas

Rychlost objektu je rychlost změny jeho pozice vzhledem k referenčnímu systému a je funkcí času. Definovat se tato veličina musí vždy velikostí a směrem. Její základní jednotkou dle SI je metr za sekundu. Vyjádřit lze dle následujícího vzorce pomocí derivace dráhy dle času a značí se písmenem *v*.

$$v = \frac{\partial s}{\partial t}$$

Dráha je délka trajektorie, kterou objekt urazí za určitý čas. Základní jednotkou je metr a značí se pomocí písmena *s*.

Čas je rovněž základní fyzikální jednotkou dle soustavy SI a vyjadřuje dobu, která uběhne mezi dvěma okamžiky. Značí se písmenem *t* a základní jednotkou je sekunda.

Všechny tyto veličiny spadají pod odvětví kinematiky, součást klasické mechaniky, popisující pohyb těles v prostoru a čase. Proto jsou velmi užitečné pro zpětnou analýzu nehodového děje. Mohou napomoct znalci vypočítat pozici každého vozidla v kterémkoli daném okamžiku. A tím pak také umožní

matematické zkoumání alternativních scénářů; například: „Jaký by byl průběh děje v případě, že by se řidič vozidla 1 rozhodl provést stejný úkon ve stejném místě, ale při nižší rychlosti?“ Graficky je příklad vyobrazen níže.

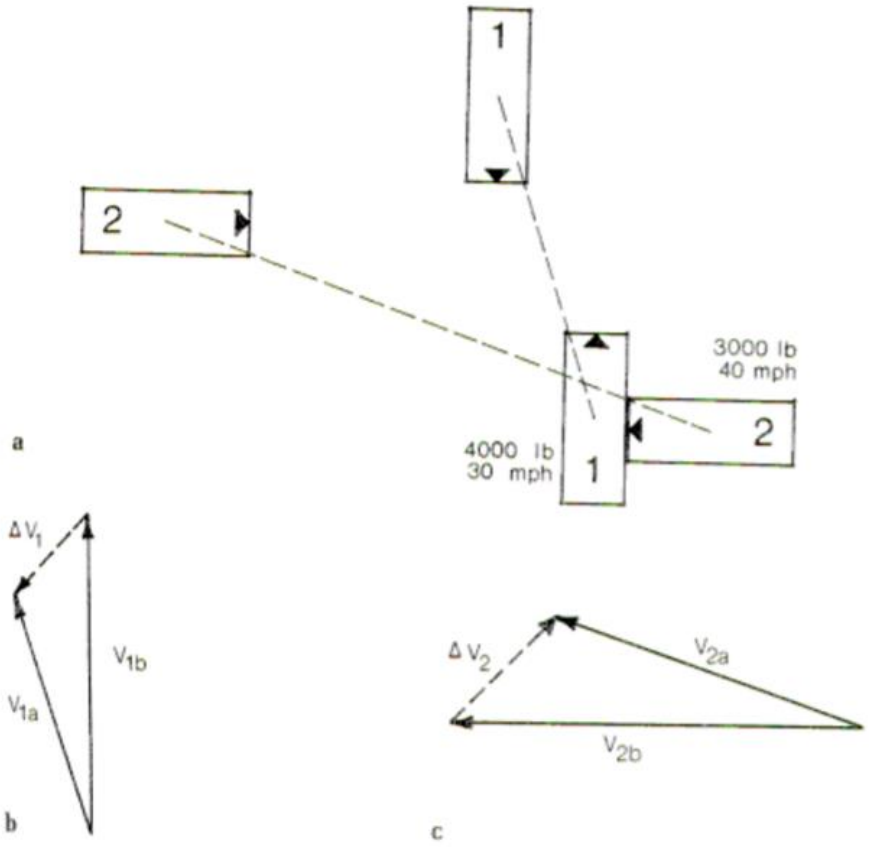
Vztah a využití těchto veličin z hlediska nehodového děje je demonstrován na Obrázek 4, jedná se o rychlostní trojúhelník pro vozidlo 1, kde V_{1b} je jeho rychlost před nárazem, V_{1a} je jeho rychlost po nárazu a ΔV_1 je změna jeho rychlosti v důsledku nárazu. Tyto tři vektory musí zpravidla tvořit uzavřený trojúhelník. Obrázek 4c představuje obdobnou analýzu pro vozidlo číslo 2.

Obrázek 5 je grafickým vyjádřením zákonu zachování hybnosti, znázorňující její složky před a po nárazu. Všechny složky hybnosti jsou také vektory a tyto dva trojúhelníky společně utvářejí celkový vektor hybnosti pro celý systém G obou vozidel.

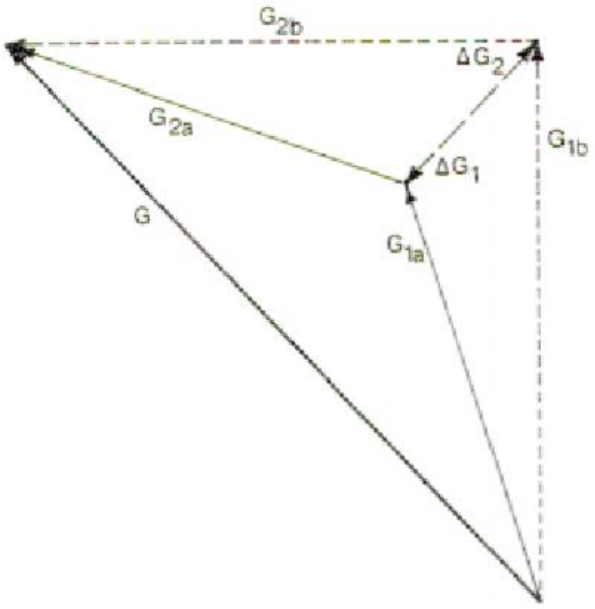
Cílem znalce je vyjádřit postupně všechny z těchto komponentů. Obvyklým postupem se veličiny určují jednotlivě a následně se sestaví dohromady, tím se snadno odhalí jakékoliv přebývající, či chybějící množství dat. Dochází tedy k situacím, kdy počet informací k uzavření trojúhelníků nedostačuje, ale i takovým, kdy existuje více dat, než je pro jedinečnost řešení nezbytně třeba.

Klasická metoda spočívá v určení rychlosti po nárazu pomocí síly a vzdálenosti definující energii rozptýlenou v trajektoriích po nárazu.

Ty se pak kombinují dle hybností a rychlostí nárazu za pomocí znalostí o směru pohybu před nárazem. Jiné metody, využívající už však výpočetní techniky, pracují s deformovanými tvary vozidel, aby určily hodnoty ΔV, tedy změny rychlosti způsobené nárazem (pomocí ΔG1 a ΔG2 na obrázku). Kombinace hodnot ΔV s rychlostmi a směry před nebo po nárazu umožňují přímé „uzavření“ rychlostních trojúhelníků. [2], [4], [5]



Obrázek 4 - rychlostní trojúhelníky



Obrázek 5 - diagram hybnosti

2.3.2 Zákon zachování hybnosti

Tento zákon je v předmětné problematice velmi často aplikovaný. Hybností se rozumí součin okamžité hmotnosti tělesa a jeho translační (dopředné, nikoli rotační) rychlosti v daném okamžiku. Platí, že hybnost (součin okamžité hmotnosti tělesa a jeho translační – dopředné, nikoliv rotační – rychlosti) soustavy všech těles před střetem (tj. součet jejich okamžitých hybností) musí být rovna hybnosti této soustavy po střetu (tzv. I. impulsová věta), pokud na soustavu během střetu nepůsobila vnější síla tak významná, aby se během krátkého trvání střetu mohla významně projevit.

Pokud budeme brát v potaz systém dvou kolidujících vozidel, kde na žádné z nich nepůsobí vnější síly, tak celková hybnost systému (pro obě vozidla společně) setrvává konstantní. Obrázek 5, kde je celková hybnost značena jako G, ukazuje, že vektor (který má oba velikost a směr) se rovná součtu vektorů hybnosti obou vozidel.

Následující rovnice uvádí tento vztah matematicky, kde indexy a, b, 1 a 2 označují, zda se jedná o rychlost po nárazu, resp. před nárazem nebo vozidlo 1 resp. 2. Výsledkem součtu součinů vektoru hmotností *m* a rychlostí vozidla *v* je pak dle definice celková hybnost systému G.

$$G = m_1V_{1a} + m_2V_{2a} = m_1V_{1b} + m_2V_{2b}$$

Protože G je stejné před nárazem jako po něm (s výjimkou vnějších sil, jako může být např. interference s chodníkem), tak součet vektorů hybnosti v okamžiku před nárazem se musí rovnat součtu hybnosti v okamžiku po nárazu. Obě tyto veličiny jsou tedy známé a konstantní. Zbývající čtyři parametry jsou rychlosti před a po nárazu obou vozidel.

Výraz lze vyřešit pouze tehdy, jsou-li známy dvě rychlosti, například u obou vozidel po nárazu, a pokud jsou známy i dva směry, například u obou vozidel před nárazem. Nejčastěji jsou po znalci požadované rychlosti před nárazem, ke kterým se lze dopracovat nejprve stanovením rychlostí po nárazu. [2], [4], [5]

2.3.3 Práce a energie

Energie je fyzikální veličina, která popisuje schopnosti hmoty konat práci. Za práci v případě mechaniky lze označit působení síly na těleso, při kterém dochází ke změně jeho polohy či jeho deformaci. Obě tyto veličiny mají shodnou jednotku nazývanou Joule a spjat je s nimi zejména zákon o zachování energie. Dle tohoto zákona se celková energie soustavy těles nemění. Přitom je třeba u každého tělesa

uvažovat energii kinetickou (pohybu), energii rotační a energii (práci) deformační, tj. energii potřebnou na vyvolání deformací tělesa při jejich vzájemném působení.

Pro zjištění deformační práce byl v teorii analýzy střetů vozidel zaveden pojem „ekvivalentní bariérová rychlost“ (EBS) nebo též „ekvivalentní energetická rychlost“ (EES). Tato veličina vyjadřuje rychlost, která při nárazu na pevnou tuhou překážku (bariéru) do zastavení způsobí stejné deformace vozidla.

Pro stanovení rychlostí po nárazu vozidel se používá zpravidla konceptu práce a energie. Pracuje se s následujícím základním odvozením:

$$W = \Delta E_k$$

$$FS = \Delta \frac{1}{2} m V^2$$

$$maS = \Delta \frac{1}{2} m V^2$$

$$\Delta V^2 = 2aS$$

$$V_0^2 - V_1^2 = 2aS$$

A předpokladu o konstantní zrychlení *a*, lze rovnici také vyjádřit jako:

$$V_{final}^2 = V^2 + 2aS$$

Symbol *W* označuje vykonanou práci, E_k kinetickou energii, *a* značí zrychlení, V_{final} pak výslednou rychlost po dané akceleraci na dráze *S.*

Vzdálenost ujetá po nárazu a hmotnost každého vozidla jsou známé veličiny. Pokud je známa i síla působící při nárazu, lze dle výše uvedených rovnic vypočítat rychlost po nárazu, která pokud je známá pro obě vozidla umožní dále výpočet rychlosti nárazové. [2], [4], [5]

2.3.4 Síla, hmotnost, akcelerace

Síla je fyzikální veličina, která vyjadřuje míru vzájemného působení těles a polí. Značí se písmenem *F* a základní jednotkou je Newton.

Hmotnost je fyzikální veličina definovaná jako vlastnost hmoty, která vyjadřuje míru setrvačných účinků. Základní jednotkou je kilogram a značí se písmenem *m.*

Akcelerace neboli zrychlení je fyzikální veličina vyjadřující míru změny rychlosti tělesa v čase, základní jednotka je metr za sekundu na druhou a značí se písmenem *a*. Podobně jako rychlost lze získat derivací dráhy dle času, lze také zrychlení získat derivací rychlosti dle času.

Tyto veličiny jsou zahrnuty hned v několika zákonech aplikovaných při analýze nehod. Patří mezi ně primárně princip setrvačnosti, který říká, že těleso setrvává ve stavu klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu, není-li vnějšími silami nuceno svůj stav měnit.

Dále se při výpočtu sil pohybu vozidla se využívá druhého Newtonova zákona síly, tedy jestliže na těleso, tedy vozidlo působí síla, pak se těleso pohybuje zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa. Nutná je pro analýzu také znalost těžiště vozidla a koeficientů tření pneumatik.

Neopomenutelný je také zákon akce a reakce, dle něj vzájemné síly mezi dvěma tělesy mají vždy stejnou velikost a opačný směr. Vyplývá z toho například, že dvě nestejná vozidla (nebo chodec a vozidlo) na sebe působí vzájemně stejnými silami, opačného směru. [2], [4], [5]

2.4 Provádění nárazových zkoušek

Nárazové zkoušky vozidel jsou experimenty konané za účelem zjištění vlastností vozidla a jeho částí při nárazu. Motivací pro provádění těchto zkoušek může být testování pasivní bezpečnosti, tzn. těch zařízení vozidla, jejichž cílem je minimalizovat následky střetu. Mezi ně patří např. konstrukce karoserie, tedy deformační zóny, opěrka hlavy, bezpečnostní pás, předpínač bezpečnostního pásu, airbagy atd. Testování těchto záležitostí je především předmětem vývoje společností působících v automobilovém průmyslu. Výsledky a data z nich jsou obvykle veřejně nedostupné, protože výrobci si je ponechávají pro své vlastní účely a drží je jako svá výrobní tajemství. Existují však instituce jako evropský Euro NCAP či americký IIHS či NHTSA, které provádějí crash testy za účelem ohodnocení a porovnání pasivní bezpečnost vozidel, tedy rozsahu vlivu nárazu při nehodě a prezentování výsledku veřejnosti. Dá se říci, že se tedy jedná o testy spotřebitelské.

Tento způsob testování je však prováděn v laboratorních podmínkách a zejména s nárazy do bariér, nikoliv do vozidel. Pro účely soudního znalectví je však stěžejní znát také data ohledně korelace při nárazu dvou a více vozidel, a to v reálném světě. Takovéto data obvykle neslouží primárně pro výzkum

a vývoj pasivní bezpečnosti, ale pro popis toho, jak se chovají deformace karoserie vozidla při určitém typu nárazu. Různá vozidla mají různou tuhost karoserie a další vlastnosti, které se mění například se stářím vozu. Proto je tedy v rámci soudně znaleckého výzkumu nutné provádět takové experimenty, u kterých budou pozorovány průběhy a výsledky deformace při známé rychlosti. Ze získaných poznatků, které bývají zpracovány do speciálních databází, lze pak čerpat při analýze nehod a pomocí kvantifikačních metod se pak díky deformacím dostat k odvození nárazové rychlosti.

2.5 Metody zjišťování nárazové rychlosti z deformace vozidla

Jedním ze základních způsobů, jak odhadnout rychlost vozidla při rekonstrukci kolize, je aplikace metod obecně označovaných jako „energetické metody“, které využívají vztahu mezi energetickým ekvivalentem rychlosti (EES) a velikost trvalé deformace vozidla. Existuje několik matematických modelů používaných v praxi k popisu takovéhoto vztahu. Obvykle se k nim řadí lineární vztah velikosti (hloubky) deformace a energie (práce) spotřebované k jejímu vzniku. Samotná deformaci a deformační energie lze popsat různými způsoby. V důsledku toho lze z výpočtů získat mírně odlišné hodnoty EES v závislosti na použitém modelu.

Energetické metody jsou založeny na předpokladu, že veškerá kinetická energie ztracená vozidlem během srážky je „spotřebována“ k deformaci vozidla, což lze symbolicky zapsat takto:

$$E_d = \frac{m\,(V^2 - V'^2)}{2} = \frac{mEES^2}{2}$$

Kde: E_d je energie trvalé deformace; m je hmotnost vozidla; V je rychlost vozidla před nárazem; V' je rychlost vozidla po nárazu.

Z toho lze pak vyjádřit:

$$EES = \sqrt{\frac{2E_d}{m}}$$

Zde je představeno několik základních metod výpočtu veličiny deformační energie.

2.5.1 Zjednodušená metoda

Tato metoda využívá pro výpočet deformační energie následující vzorec.

$$E_d = \frac{1}{2}\ K\ C_{sr}^2 = \frac{1}{2}\ w_d\ \ h_d\ C_{sr}^2\ \ k$$

Kde: *K* je koeficient tuhosti karoserie vozidla, C_{sr} je trvalá hloubka deformace vozidla, W_d je průměrná šířka deformace, h_d je průměrná výška deformace a *k* je jednotkový koeficient tuhosti karoserie.

2.5.2 Campbellova (základní) metoda

Zde se využívá vzorce, který vede přímo k rychlosti shodné s EES:

$$V = \ b_0 + b_1 C_{sr}$$

Kde: *V* je rychlost vozidla narážejícího předkem na tuhou bariéru, b_0 - minimální rychlost při které dochází k trvalé deformaci karoserie vozidla, b_1 - sklon přímky $V=V(C_{sr})$.

2.5.3 McHenryho metoda

Zde se opět využívá výpočtu deformační energie ovšem za použití vzorců:

$$E_d = \ w_d\ \left(AC_{sr} + \frac{BC_{sr}^2}{2} + G\right)$$

$$G = \frac{A^2}{2B}$$

A je koeficient definující minimální hodnotu prahové síly, při které dochází k plastické deformaci, B je součinitel tuhosti karoserie vozidla, který definuje jednotkovou podélnou tuhost a G je energie plastické deformace.

2.5.4 Metoda CRASH3

Pro tuto metodu platí:

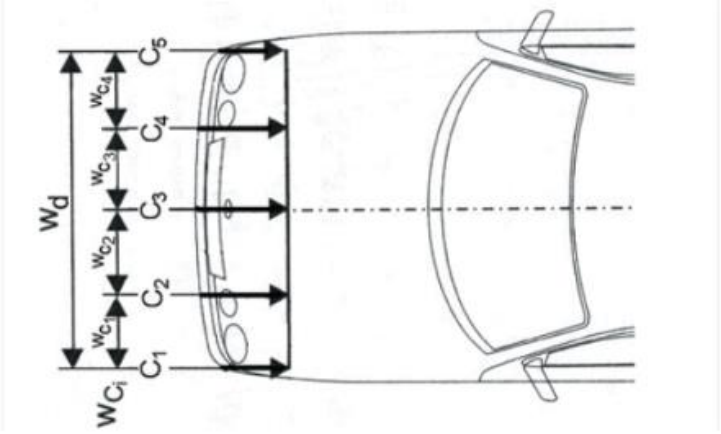
$$E_d = \frac{w_d}{n-1}\left(\frac{A\alpha}{2} + \frac{B\beta}{6}\right) + (n-1)G$$

Kde α, β jsou konstanty n-tého bodu a n je počet bodu měření hloubky deformace. Koeficienty α, β jdou vyjádřit jako:

$$\alpha = C_1 + C_n + 2\sum_{i=2}^{n-1} C_1$$

$$\beta = C_1^2 + C_n^2 + 2\sum_{i=2}^{n-1} C_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} C_i C_{i+1}$$

Složky vzorce jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 6 - model vozidla pro výpočet energie deformace

2.5.5 Metoda využívaná v softwaru PC – Crash

U této metody se pro výpočet deformační energie aplikuje vztah:

$$E_d = \sum_{i=1}^{i=n-1} w_{ci}\left[\frac{A}{2}(C_{i+1} + C_i) + \frac{B}{6}\frac{C_{i+1}^3 - C_i^3}{C_{i+1} - C_i} + G\right]$$

Kde w_{ci} je šířka mezi po sobě jdoucími body měření hloubky deformace (viz obr. 11). V programu PC-CRASH bývá použita metoda CRASH3, ovšem způsob vstupu do deformačního profilu je upraven tak, aby umožnil zavedení různých hodnot w_{ci}. Velikost deformace byla odhadnuta měřením jeho geometrických rozměrů v několika bodech (rovněž obr. 11). Průměrná hloubka deformace pak byla vypočtena z vzorce:

$$C_{sr} = \left(\frac{C_1}{2} + \sum_{i=2}^{i=n-1} C_i + \frac{C_n}{2} \right) / (n-1)$$

Kde C_i je deformace v i-tém bodě měření a *n* je počet měřených bodů.

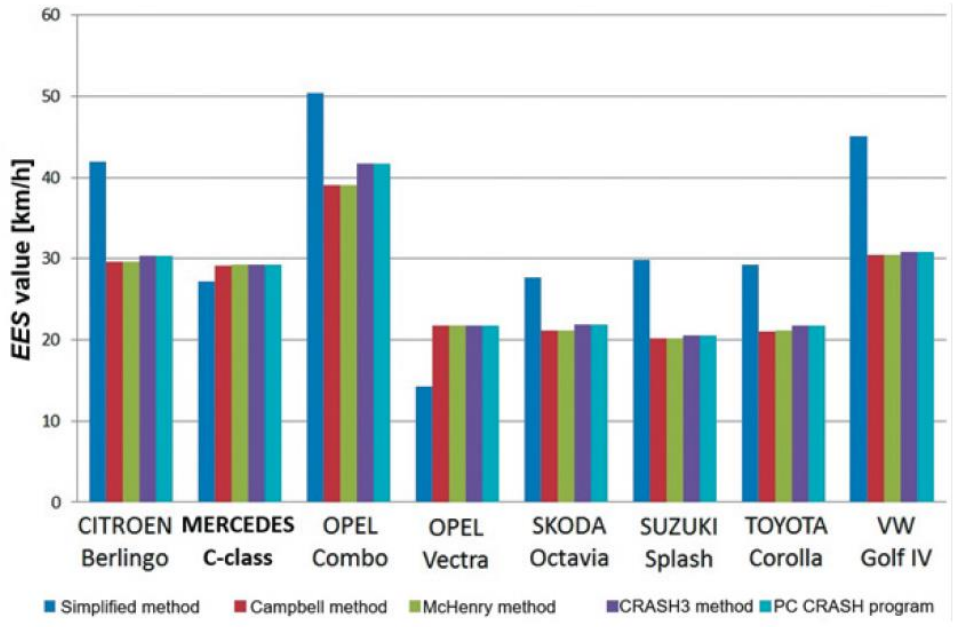
Zde byl učiněn předpoklad, že jediným zdrojem nejistoty bylo měření geometrické veličiny, která popsala deformaci. Nejistota byla stanovena pomocí metody totální diference, kde celkový rozdíl byl vyjádřen v následující obecné podobě:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} . \Delta x_i \right|$$

Kde Δy je nejistota zjišťované veličiny EES, Δx_i je nejistota známé veličiny x_i (C_i), $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ hodnota koeficientu citlivosti *y* ve vztahu k x_i pro nominální hodnotu x_i.

2.5.6 Srovnání metod

Na základě dat ohledně deformací z poškozených vozidel při čelním nárazu v reálném provozu bylo umožněno srovnání výsledků metod u jednotlivých vozidel. Následující graf tedy ukazuje tuto jejich komparaci.



Obrázek 7 - srovnání metod výpočtu EES

Z grafu je více než patrné, že metoda zjednodušená se svými výsledky ostatním vymyká téměř u všech vozidel, a dokonce až o 15 km/h. Zatímco výsledky metod ostatních zůstávají téměř totožné. Lze tedy konstatovat, že energetický ekvivalent rychlost (EES) nelze přesně odhadnout, pokud jsou dostupné údaje omezeny na trvalé hodnoty deformace karoserie. [11], [12], [13], [14]

2.6 Základní typy nárazových zkoušek pro testování pasivní bezpečnosti vybraných společností

V této kapitole jsou pro srovnání popsány způsoby provádění vybraných základních testů dvou nejpopulárnějších společností, americké IIHS a evropské Euro NCAP, které na rozdíl od automobilek a společností provádějící testy homologační poskytují protokoly o metodice provádění a vyhodnocování jejich nárazových zkoušek.

2.6.1 Přední náraz

IIHS provádí tři různé zkoušky čelního nárazu: test středního překrytí (dříve známý jako test čelního offsetu), test malého překrytí na straně řidiče a test malého překrytí na straně spolujezdce. Společnost Euro NCAP provozuje přední náraz s plným překrytím do tuhé bariéry nebo s překrytím částečným do bariéry deformovatelné.

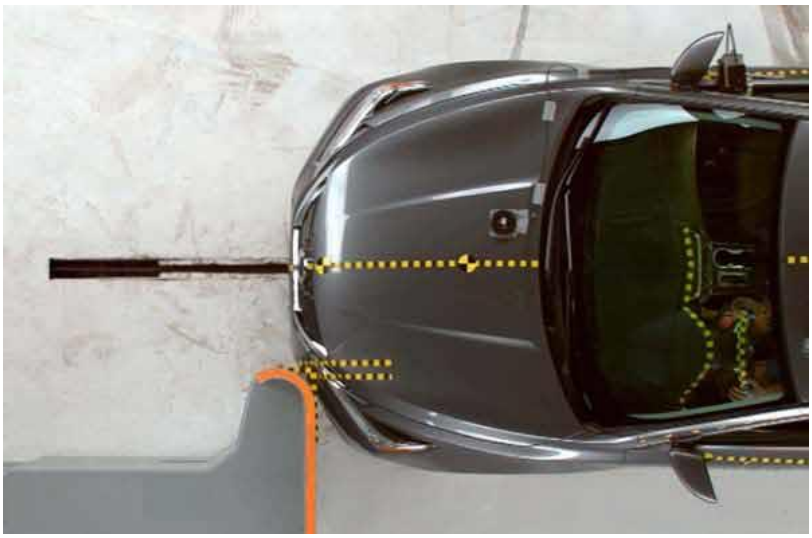
Obrázek 8 IIHS test středního překrytí

IIHS - Test středního překrytí

V začátcích provozování tohoto typu testů společností IIHS, byla většina vozidel hodnocena jako špatná nebo na pomezí bezpečnosti. Dnes však dobré hodnocení získávají všechna vozidla. Obytné prostory jsou mnohem silnější, než tomu bylo dříve. Odolávají nárazu a umožňují bezpečnostním pásům a airbagům vykonávat spolehlivě jejich funkci.

Při IIHS čelním testu se středním překrytím se vozidlo pohybuje rychlostí 40 km/h směrem k překážce s deformovatelnou čelní stranou vyrobenou z hliníkové voštiny. Šířka výstupku bariéry měří něco okolo 30 cm. Na sedadle řidiče je umístěna figurína Hybrid III představující muže průměrné velikosti. 40 % z celkové šířky vozidla narazí na bariéru na straně řidiče.

Síly při zkoušce jsou podobné silám, které by byly způsobeny čelním nárazem dvou vozidel stejné hmotnosti, z nichž každé by se pohybovalo rychlostí těsně pod 40 km/h.

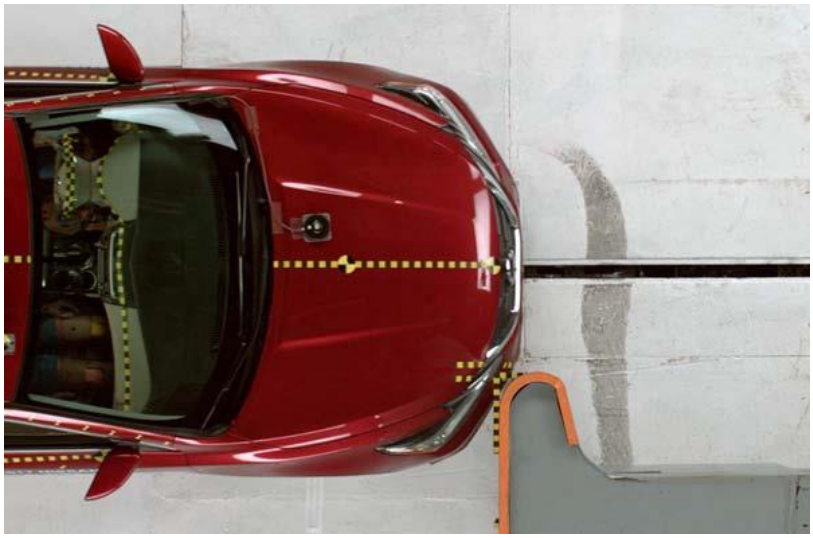


Obrázek 9 - IIHS test malého překrytí na straně řidiče

IIHS - Test malého překrytí na straně řidiče (driver side small overlap)

Aby bylo možné dále zlepšovat ochranu pří čelním nárazu, zavedlo IIHS v roce 2012 malý čelní nárazový test s překrytím na straně řidiče. Zkouška je určena k replikaci toho, co nastane v případě, že přední levý roh vozidla srazí s jiným vozidlem v daném úhlu nebo s předmětem, jako je strom nebo či sloup veřejného osvětlení. Tento test lze považovat za výzvu pro konstrukce bezpečnostních pásů a airbagů, protože cestující se pohybují směrem dopředu i směrem kolmo k boku vozidla.

Při tomto testu se vozidlo pohybuje rychlostí 40 km/h směrem k pevné tuhé bariéře. Na sedadle řidiče je umístěna figurína Hybrid III představující muže průměrné velikosti. Dvacet pět procent z celkové šířky vozidla pak narazí na bariéru na straně řidiče.



Obrázek 10 - IIHS test malého překrytí na straně spolujezdce

IIHS - Test malého překrytí na straně spolujezdce (passenger side small overlap)

Výrobci reagovali na test malého překrytí na straně řidiče zlepšením struktury vozidla a airbagů a většina vozidel nyní získává dobré hodnocení. Výzkumné testy IIHS však ukázaly, že tato vylepšení nebyla vždy přenesena na stranu cestujících. Rozdíly mezi levou a pravou stranou vozidel tedy přiměly IIHS vyvinout malý test čelního překrytí na stranu spolujezdce.

Zkouška na straně spolujezdce je stejná jako zkouška na straně řidiče s výjimkou, že vozidlo překrývá bariéru na pravé straně. A použity jsou dvě figuríny Hybrid III, jedna na sedadle řidiče a druhá na sedadle spolujezdce.

Obrázek 11 - Euro NCAP test plného překrytí

Euro NCAP - Test plného překrytí

Euro NCAP testuje automobily při nárazu do tuhé bariéry s plným překrytím při zkušební rychlosti 50 km/h. Na sedadle řidiče a na zadním sedadle za spolujezdcem je umístěna malá figurína reprezentující ženskou populaci.

Tato zkouška má vysoké nároky na zádržné systémy na předních a zadních sedadlech. Velmi přísné limity jsou také kladeny na vychýlení a přetížení hrudníku cestujících. Proto musí být nalezena rovnováha mezi zádržným systémem, tedy jeho dostatečnou tuhostí, aby udržel figurínu mužského pohlaví při zkoušce 64 km/h, ale zároveň taky dostatečná poddajnost, aby způsobila zranění na ženě způsobené silami při prudkém zpomalení.

Obrázek 12 - Euro NCAP test částečného překrytí

Euro NCAP – Test částečného překrytí

V tomto test je vůz poháněn rychlostí 64 km/h s 40% překrytím do deformovatelné bariéry, která představuje protijedoucí vozidlo. Test reprezentuje náraz dvou vozů o stejné hmotnosti, přičemž oba se pohybují rychlostí 50 km/h. Figuríny představující průměrného samce se usadí na přední sedadla a dětské figuríny se umístí do dětských zádržných systémů na sedadla zadní.

2.6.2 Boční náraz

Boční nárazy způsobují asi čtvrtinu úmrtí cestujících v osobních automobilech ve Spojených státech. Ochrana lidí při bočních nárazech je náročná, protože strany vozidel mají relativně malý prostor k absorbování energie, na rozdíl od přední a zadní části vozidel, které mají značné deformační zóny.

Boční airbagy, které jsou dnes ve většině nových osobních vozidel standardem, jsou navrženy tak, aby zabránily lidem v kolizi s vnitřkem vozidla a s předměty mimo vozidlo při bočním nárazu. Zabraňují také působení nárazových sil na část těla cestujícího. Samotné postranní airbagy však nestačí. Zásadní jsou také silné struktury karoserie, které dobře fungují zároveň s airbagy.

Při zkoušce IIHS narazí bariéra podobná vozidlu SUV na stranu řidiče rychlostí 31 km/h. Na sedadle řidiče a na zadním sedadle za řidičem jsou umístěny dvě figuríny SID-II představující malé (5. percentil) ženy nebo 12leté děti.

Obrázek 13 - Euro NCAP boční náraz

IIHS byla první ve Spojených státech, která použila tuto menší figurínu při spotřebitelských testech. Byla zvolena proto, že u žen je větší pravděpodobnost vážných zranění hlavy při bočních nárazech v reálném světě než u mužů. Nižší řidiči mají větší šanci, že se jejich hlavy dostanou do kontaktu s přední částí vozidla narážejícího z levé strany.

Při testu společnosti Euro NCAP je na vozíku namontovaná deformovatelná bariéra a je poháněna rychlostí 50 km/h do strany stacionárního zkušebního vozidla pod úhlem 90°. Figurína představující průměrného muže se umístí na sedadlo řidiče a dětské figuríny se umístí do dětských zádržných systémů na zadních sedadlech vozidla.

Zkouška ověřuje dostatečnost ochrany kritických oblastí těla pasažéra. To vedlo k posílení struktur vozidel kolem B sloupku (mezi dveřmi), montáž bočních airbagů, ale také k vývoji struktur pohlcujících energii v sedadlech a panelech dveří. [15] [16]

Obrázek 14 - IIHS boční náraz

2.7 Elektronická nehodová data pro účely soudního znalectví a jejich analýza na základě experimentů

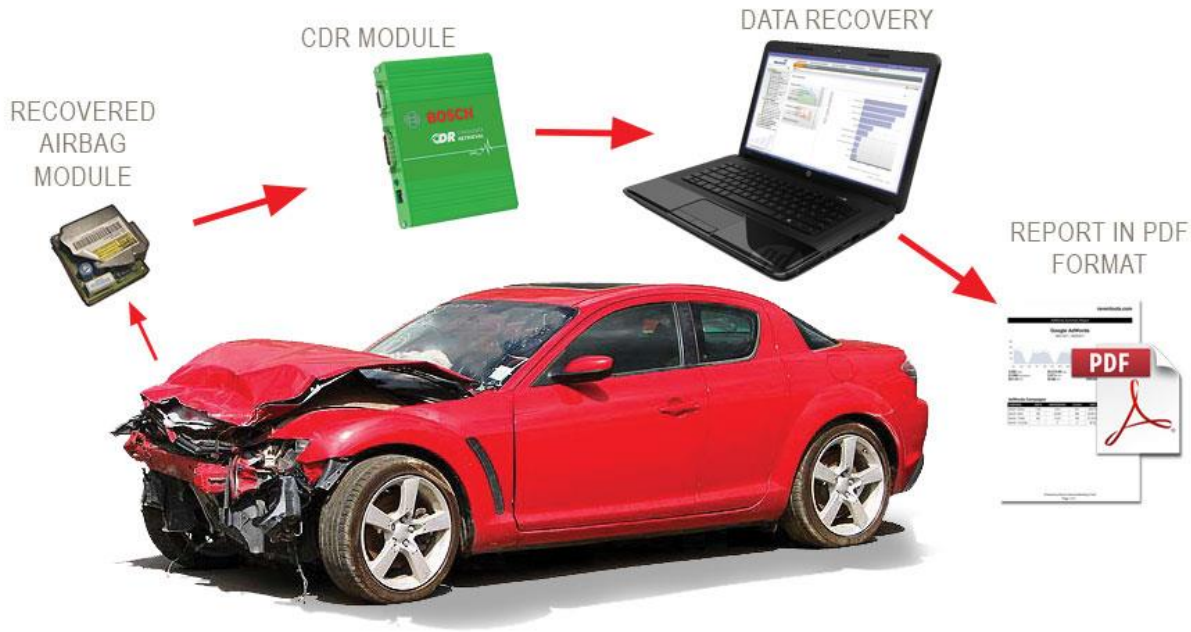
2.7.1 Event data recorder a Crash data retrieval

Přístroje pro zápis nehodových dat (EDR) jsou systémy sloužící k záznamu o kolizích instalované v mnoha vozidlech jako součást snímacích a řídicích modulů používaných k identifikaci nehodové události a impulzu pro spuštění airbagů. EDR bylo prvně zavedeno do sériově vyráběných vozidel společností General Motors v 90. letech a nástroj pro vyčtení dat o nehodě (CDR) byl následně komerčně dostupný společností Vetronix Corporation (nyní Bosch Diagnostics).

Nástroj CDR tak umožnil znalcům stahovat a analyzovat data zachycená EDR při reálných nehodách. Ve vozidlech mohou takto získaná data zahrnovat informace o fyzikálních veličinách charakterizujících nehodový děj, obvykle se jedná o změnu rychlosti (delta-V) v závislosti na čase, časový okamžik spuštění airbagu a předpínače bezpečnostního pásu, anebo určitý rozsah dat průběhu veličin v čase před nárazem, jako je rychlost vozidla, sešlápnutí plynu a brzdy a použití bezpečnostních pásů.

Dostupnost údajů závisí na roce, značce a modelu vozidla, protože různá vozidla jsou často vybavena různými typy systému EDR. Obecně mají novější vozidla sofistikovanější záznamové systémy, které ukládají data rozmanitější data. Například některá vozidla poskytují jak podélnou, tak boční deltu-V, parametry nasazení předpínačů bezpečnostních pásů a vícestupňových spouštěčů airbagů, informace o bočních airbazích a údaje o řízení před nárazem (natočení volantu apod.).

Potenciální bezpečnostní výhody, které by mohly vyplynout z použití informací získaných z EDR, byly zaznamenány již dříve. Například organizace National Highway Traffic Safety Administration zjistila, že jednotky EDR by mohly být využity ke zlepšení systémů ochrany cestujících, zvýšení bezpečnosti na dálnicích, snížení počtu a závažnosti nehod prostřednictvím povědomí řidičů o dostupnosti zařízení a jejich možnosti záznamu. [6] [7] [8] [9] [10]



Obrázek 15 - ilustrace procese zisku nehodových dat – atecea.ie

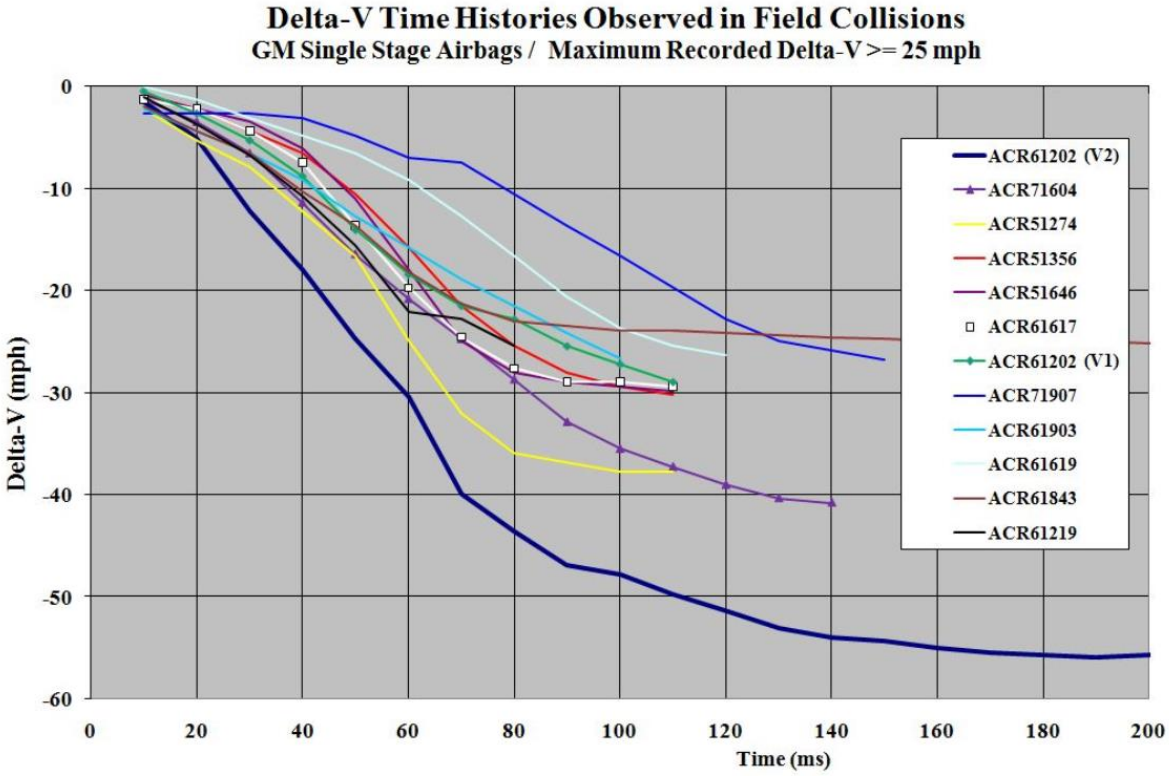
2.7.2 Verifikace a validace systémů EDR s CDR na základě experimentů

Verifikace a validace systémů EDR a CDR se nejlépe ověří nárazovou zkouškou vozidla vybaveného těmito systémy. Během této zkoušky se mimo jiné nainstaluje do vozidla tzv. referenční zařízení, které provádí nezávislé a velmi přesné měření veličin shodných s veličinami, které poskytuje měření a vyčítání systému EDR a CDR. Takový výzkum provedl například tým vědců v Ottawě roku 2004.

Během těchto experimentálních nárazových testů se informace o nárazovém impulsu zachycené systémem EDR ukázaly jako přiměřeně přesné při porovnání s ekvivalentními daty získanými laboratorním přístrojem. Vyhodnocena byla data ze série nárazových testů vozidel General Motors, provedených při různých rychlostech a konfiguracích kolizí, a zjistili, že data EDR se obecně nacházejí ve stanovených tolerancích. V některých případech však EDR nedokázaly zachytit celý nárazový impuls v důsledku omezení úložiště nebo přerušení napájení. Podobná zjištění byla publikována jinými autory pro postupné kolize týkající se vozidel vyrobených General Motors, Ford a Toyota.

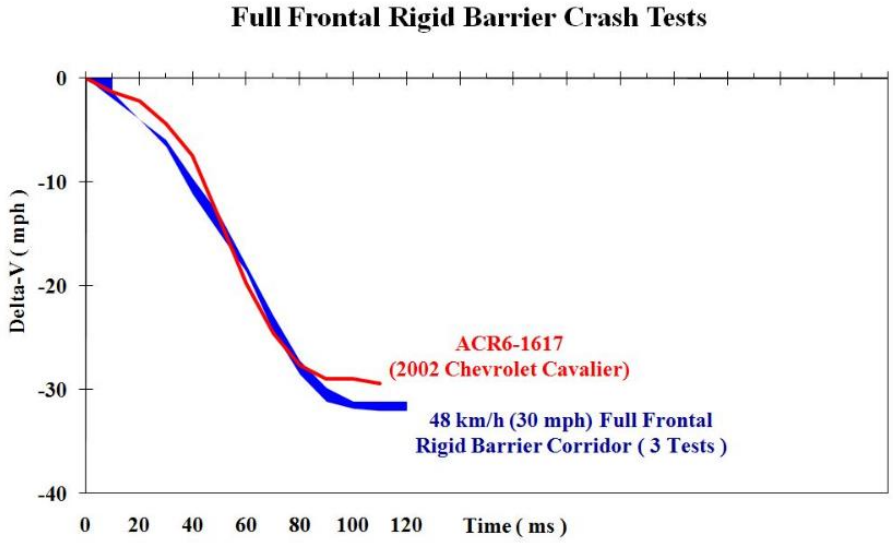
Jedním ze zajímavých poznatků této studie je, že u záznamů EDR existují určité problémy s časováním. Zejména, když náraz do tuhé bariéry obvykle generuje rychlý náběh zpomalení vozidla, může puls pro určitá vozidla vykazovat zřetelný časový posun v kladném směru, v důsledku se tedy počáteční hodnoty delta-V (tj. pro t = 10, 20 ms atd.) zaznamenávají jako nula.

Také stojí za zmínku, že některé EDR zaznamenaly nárazový impuls po dobu 300 ms a mohly tak zachytit celou kolizní událost. Jiné EDR, které byly zapojené do této série testů, měly záznamové paměti, které byly omezenější, často s rozsahem pouhých 150 ms, a tak jimi byl zaznamenán pouze primární náraz, avšak často se nezaznamenala odrazová fáze kolize. Výsledky jsou ukázány na následujícím grafu.

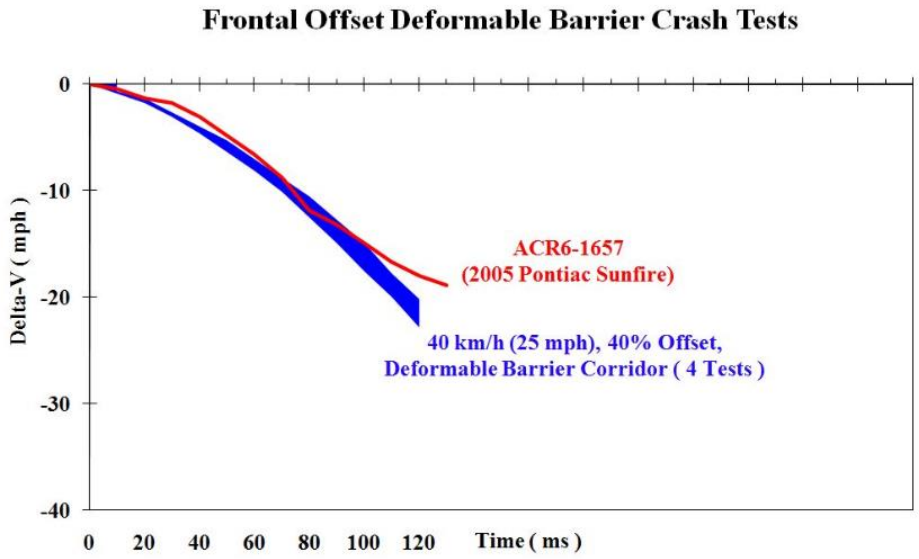


Obrázek 16 - ukázka časového odstupu měření při nárazech

Dále byly v rámci výše zmíněné studie srovnány data ohledně delty V z EDR při reálných nehodách s daty z vozidel laboratorně testovanými při srovnatelných podmínkách. První reálný náraz odpovídal přibližně zkoušce čelní tuhé bariéry v rychlosti 48 km/h a druhý přibližně 40 km/h pro čelní srážku s deformovatelnou bariérou a 40 % překrytím.



Obrázek 17 - graf srovníní průběhu delty v u laboratorního testu nárazu do pevné bariéry a průběhu delty v u obdobné reálné nehody



Obrázek 18 - graf srovnání průběhu delty v u laboratorního testu nárazu do deformovatelné bariéry a průběhu delty *v* u obdobné reálné nehody

2.7.3 Návaznost na předmětnou práci

Jako součást praktické části této práce bylo rovněž vykonáno experimentální měření v podobného charakteru. Za účelem zjištění stupně validace a verifikace systémů EDR a CDR bylo provedeno několik experimentálních měření formou série nárazových testů na vybraných vozidlech těmito systémy vybavených. Do vozidel bylo také nainstalováno referenční zařízení využívané při klasických nárazových testech pro vývoj pasivní bezpečnosti. Toto zařízení kontinuálně poskytovalo přesná data ohledně akcelerace v místech řídící jednotky vozidla po celou dobu pokusu a sloužilo tak ke kontrole údajů z EDR. Produktem experimentu byly mimo jiné také záznamy z rychlokamer, které byly v závěru srovnány s výstupem simulačního programu Virtual Crash, jež simuloval průběh nehody s daty získanými právě zařízením CDR. Čímž se naskytla možnost ověření významu těchto dat pro soudně znaleckou činnost v dopravě. Postup, metody, výsledky tohoto experimentu a jejich analýza jsou předmětem následujících kapitol. [6] [7] [8] [9] [10]

2.7.4 Nezbytnost elektronických nehodových dat pro analýzu nehod v současné době

Čím dál více jsou v nově vyrobených vozidlech instalovány různé asistenční systémy za účelem zvýšení jak aktivní, tak pasivní bezpečnosti, jejichž pozitivní efekt na snižování nehodovosti a dopadů nehod je nevyvratitelný. Ovšem některé z těchto systémů, jako například ABS / ESP bohužel eliminují vznik viditelné stopy pneumatik, jejichž délka, poloha a směr jsou bezesporu jedny z nejdůležitějších vstupních informací pro analýzu nehodového děje. Pokud není možné čerpat spolehlivě z elektronických systémů alespoň data ohledně pohybu vozidla před střetem (brzdění, smýkání) a

pohybu vozidla po střetu (decelarace, rychlost), dostává se tak analytik nehody před neřešitelnou úlohu.

Mimo to by bylo z paměťové jednotky pro diagnostiku závad, která je aktivovaná při dopravních nehodách v důsledku chybné funkce jednotlivých modulů, možné dovodit rychlosti pro okamžik nárazu a počátek brzdění před nárazem a také by bylo možné posoudit, které součásti vozidla byly zničeny až při dopravní nehodě. V současnosti však nejsou znalcům ani policii přístupná žádná rozhraní, která by jim umožňovala vyčítání dat u reálných nehod a jejich následnou analýzu. Tento cenný materiál tak zůstává nevyužit. [6] [7] [8] [9] [10]

3 Experiment – praktická část

Během posledního týdne září roku 2019 proběhla ve Středočeském kraji v katastru obce Milovice v bývalém vojenském areálu řada nárazových testů vybraných vozidel. Testy byly zorganizovány pospolitě, právě v průběhu několika dnů zmíněného týdne. Během těchto nárazových zkoušek byla provedena řada experimentálních měření, jejichž účelem bylo získávání dat z nezávislých referenčních měřících zařízení s vysokou přesností pro jejich následnou komparaci s daty vyčtenými a dekódovanými z jednotky EDR a řídící jednotky testovaných vozidel. Cílem tohoto testování je verifikace zařízení CDR pro vyčítání dat z jednotky EDR v prostředí, které se snaží býti co nejpřesnějším obrazem reálné situace dopravní nehody. Během testů byly pořízeny také rychlokamerové záznamy, které poslouží pro závěrečné srovnání, při kterém se dá do kontrastu simulace v softwaru Virtual Crash na základě dat o rychlosti z EDR a posoudí se, zda tyty průběhy nehod odpovídají.

3.1 Itinerář nárazových testů

Testovací itinerář s jednotlivými simulacemi typů dopravních nehod vychází z analýzy vytipovaných dopravních nehod projektu VIMOT. Pro tuto práci z nich byly vybrány následující střety:

- Boční náraz dvou paralelně jedoucích osobních vozidel v tentýž směru
- Čelní náraz do levého zadního rohu brzděného vozidla.
- Čelní náraz do přídě osobního vozidla v klidu
- Čelní náraz do záděosobního vozidla v klidu

3.2 Kritéria výběru vozidel

Zkoušená vozidla byla zvolena se speciálním ohledem na schopnost vyčtení nehodových dat. Data z EDR byla pomocí zařízení CDR vyčtena jak před jednotlivými testy, tak po nich, aby se zabránilo případným nesrovnalostem v historii vyčtených nehodových událostí. Totožným způsobem se vyčetly informace o závadách systému vozidel z řídící jednotky pomocí pořízených standartních diagnostik. Tímto byl nejen získán přehled o stavu vozidel, ale také o funkčnosti vybraných diagnostik. Konkrétně se jednalo o přístroje Bosch KTS 590 a TEXA Navigator Nanos.

3.3 Použitá technická aparatura

Pro referenční měření byla aplikována aparatura projektu VIMOT 4U, tedy datová ústředna Krypton vyrobena společností DEWEsoft, dále měřící zařízení PicDAQ a časová brána TAG Heur. Mimo to také zařízení participovaného ústavu ČVUT a to konkrétně totální stanice Topcon GPT-7003i, která spolehlivě posloužila pro geodetické zaměření výchozích a konečných poloh vozidel. Mimo klasické tradiční metody záznamu a zpracování poškození vozidel pomocí ručního měření a fotografování byly použity i modernější technologie jako 3D skenery a pozemní i letecká fotogrammetrie. Pro tyto účely byl zvolen fázový laserový skener FARO Focus s příslušenstvím (mj. sférické terče), ale nově také progresivnější skener Leica RTC360, fotoaparáty Nikon D850 a Sony A6300, vysokorychlostní fotoaparát sony RX 100 V nebo také bezpilotní prostředek DJI Phantom 4 Pro, či DJI S900.

3.4 Referenční měřící zařízení

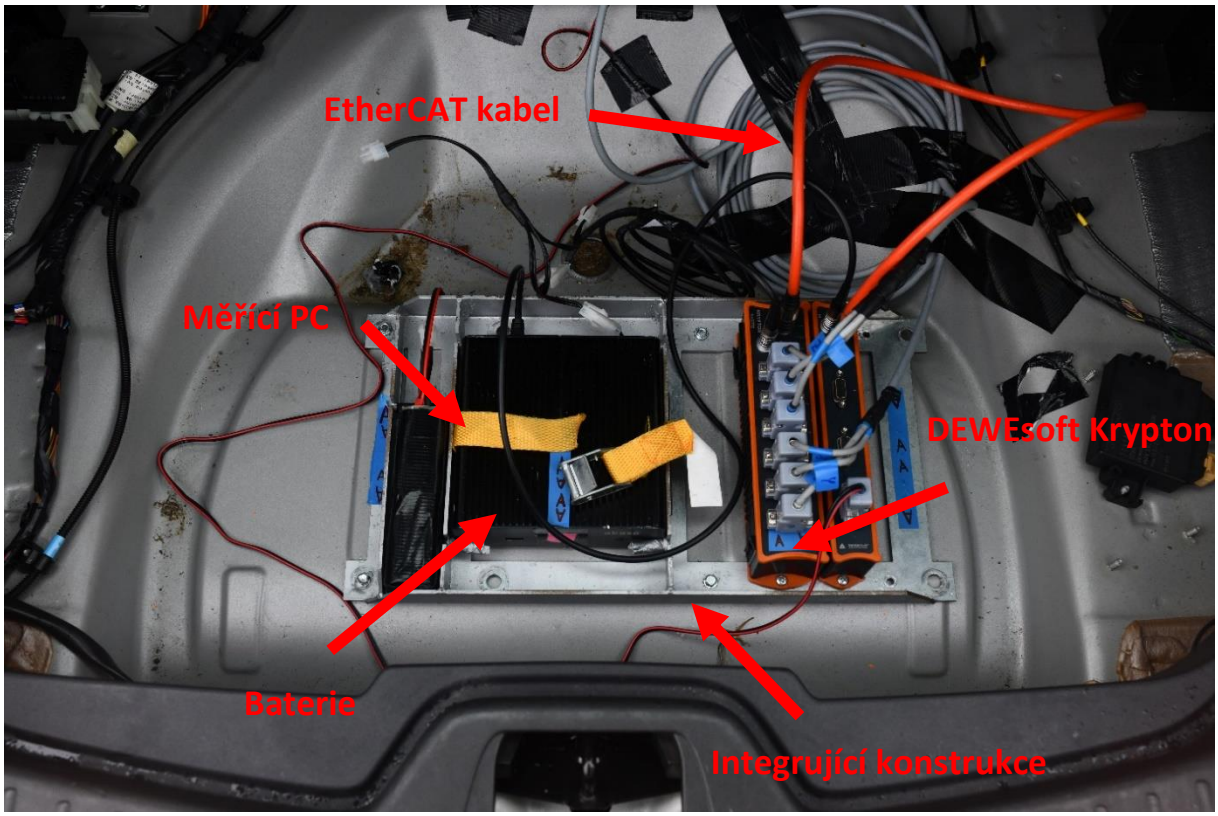
Pro účely tohoto referenčního měření bylo zvoleno již výše zmíněné zařízení DEWESoft Krypton (a jeho příslušenství), sloužící jako datová ústředna, které lze také považovat za jistý „black box“ celého měřícího systému, jehož vstupy jsou elektrické impulsy získané prostřednictvím senzorů umístěných do požadovaných poloh ve vozidle a zaústěnými do ústředny datovými kabely. Výstupem jsou pak data ohledně senzory měřených veličin v požadované zvolené frekvenci, ukládána do měřícího počítače spárovaného s datovou ústřednou. V experimentu byly na této datové ústředně použity jen senzory měřící zrychlení, tedy akcelerometry v každém vozidle umístěny dva, jeden situován co nejblíže řídící jednotky vozidla pro smyslnost následného porovnání s daty vyčtenými z EDR a druhý co nejblíže těžiště vozidla. Mimo tyto senzory byl pak použit pouze napěťový trigger reagující na tlak při nárazu změnou napětí a umístěný na předpokládanou plochu prvního doteku kolidujících vozidel a sloužící tímto k přesnému získání času střetu vozidel. Tato soustava je dále v textu označována jako měřící systém Krypton. Druhým užitým zařízením byl snímač PicDAQ výrobce DSD, oplývající jednodušším konstrukčním řešením s tím spjatou menší pravděpodobností výpadku, avšak nižším rozsahem, frekvencí a citlivostí a také uzavřenými možnostmi měření (nemožnost paralelního měření s jinými senzory v téže časové linii). Výstupem tohoto přístroje byla mimo jiné ve třech osách o zrychlení a úhlové rychlosti o frekvenci 1 000 Hz.

Mimo to byla použita profesionální figurína Hybrid III vybavená moderní technologií InDummy, tedy měřícím systémem obsahujícím téměř veškerou aparaturu, včetně datové ústředny, senzorů a částečně kabeláže přímo ve svém těle, čímž se práce s instrumentací i s přípravami na měření díky automatickému softwaru na ukládání dat sníží na minimum.

Měřicí počítač byl zkonstruován na půdě ČVUT v Praze Fakulty dopravní pro využití v extrémních případech, jako jsou právě nárazové testy, není v něm tedy využito žádných otáčivých nebo volně uložených součástek. Ve zjednodušeném pohledu se jedná o základní desku vybavenou základními PC komponentami včetně síťové karty a WiFi modulu, která je zabudována do hliníkového šasi. Ovládání počítače, kterým je měření nastavováno, softwarově prováděno a na jehož disk jsou naměřená data ukládána, nově probíhá pomocí odnímatelného mobilního monitoru. Druhou možností stále zůstává komunikace buďto pomocí bezdrátového spojení nebo pomocí LAN kabelu a funkce vzdálené plochy.

Ústředna Krypton nabízí dvě různá provedení, a to dva kusy 3xSTG a dva kusy 6xSTG, dohromady tak umožňuje zapojit až 18 kanálů, přičemž na každém z nich je možno měřit frekvencí až 20 kHz. Její provedení je modulární, proto bylo možné ji při testech s více než dvěma automobily rozdělit a vytvořit tak dvě na sobě nezávislé referenční soustavy. Komunikace a přenos dat mezi ústřednou a počítačem i mezi jednotlivými moduly probíhá za pomoci tzv. EtherCAT protokolu a EtherCAT kabelu, který umožňuje jak přenos dat, tak elektrické energie a zajišťuje rychlejší a bezpečnější komunikaci mezi zařízeními. Krypton byl po dobu průběhu jednotlivých testů napájen 12 V článkovou baterií.

Sestava sytému Krypton, měřicího počítače a baterie byla umísťována a připevňována ke kovové konstrukci, jež byla šroubovým spojem přichycena na vhodné místo na karoserii automobilu s ohledem na její bezpečí při konkrétním typu nárazu. Pohled na aktuálně použité uskupení sestavy systému je znázorněno na ilustrativním obrázku níže.



Obrázek 19 - Ilustrativní zapojení a upevnění referenční soustavy

Pro snímání jednotlivých veličin byly využity následující zařízení:

- Tříosé MEMS akcelerometry
    - Measurement Specialities, modelová řada 1203, rozsah ±500g

      Výrobní číslo: A043558, A043556

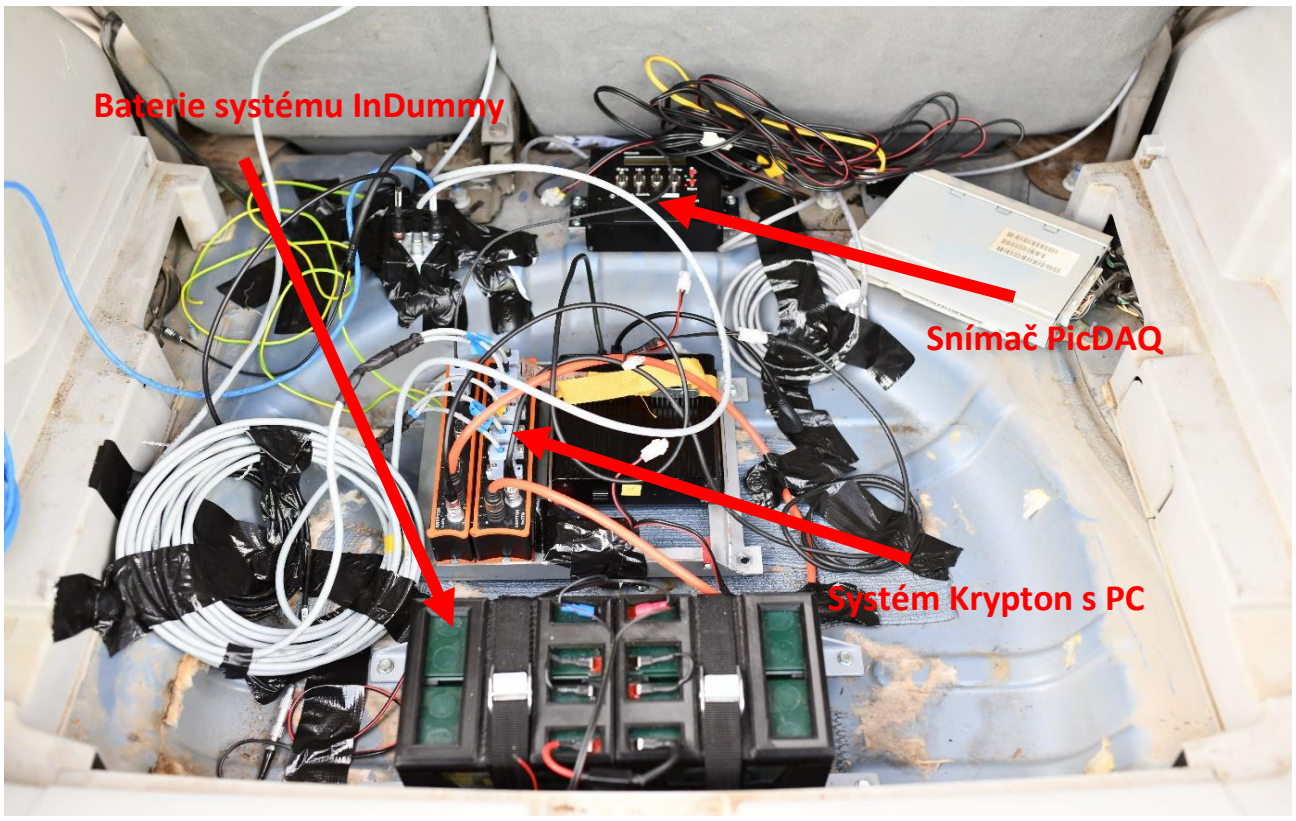
    - Measurement Specialities, modelová řada 1203, rozsah ±1000g

      Výrobní číslo: A067738 a A067737

Figuríny, které však ne vždy byly využity při konání jednotlivých experimentů:

- Dospělý muž Hybrid III – 50. percentil (tzv. 50% muž – figurína, jež svojí velikostí odpovídá průměrnému zástupci mužské populace)

Obrázek 20 - lustrační fotografie figurín Hybrid III



Obrázek 21 - Uložení zařízení ve vozidle Toyota RAV během testu s převrácením vozidla

3.5 Testovací vozidla

Vozidla byla vybíraná s kritériem možnosti vyčítání nehodových dát EDR z řídící jednotky airbagu vozidla se systémem CDR. Ne všechny vozidla vyrobené pro evropský trh jsou vybavené záznamníkem nehodových údajů EDR. Pro testy byly zvolené automobily Toyota, Dodge a Volvo, které se se systémem EDR prodávají i v Evropě. Při testech byla použita Vozidla Toyota Auris, Toyota Aygo, Dodge Caliber, Volvo V60. Vyčítání nehodových dat z EDR za pomocí CDR systému bylo vykonávané před začátkem testovacího procesu a po každém vykonaném testu. Taktéž bylo provedeno vyčítání řídících jednotek vozidel se zakoupenými standardními servisními diagnostikami Bosch KTS 590 a TEXA Navigator Nanos, aby byly zjištěny informace o poruchách systému vozidla před a po vykonaném testu a o využitelnosti diagnostik v rámci navrhovaného pracovního postupu.

CDR u všech následujících vozidel poskytuje zpravidla tyto údaje: zápisy o posledních třech zaznamenaných nehodových událostech. K nim jsou uvedeny informace o typu nárazu (čelní/zadní, boční na stranu řidiče, boční na stranu spolujezdce), čas od nárazu do příkazu k použití airbagů a předpínače bezpečnostních pásů čas od předcházející události. Dále jsou uvedeny hodnoty vývoje rychlosti (delta V) v [MPH] a [km/h] v případě podélného nárazu po přibližně 10 ms v délce trvání přibližně 200 ms, v případě bočního nárazu po přibližně 4 ms v délce trvání přibližně 100 ms, a to ze senzorů v oblasti řídicí jednotky, B-sloupku a C-sloupku. K dispozici jsou také přednárazové údaje v intervalu 0 s až 5 s, první údaj je uveden 0,4 s nebo 0,8 s před nárazem, dále po 1 s. Mezi ně patří rychlost, použití brzdy, případně stlačení pedálu plynu a otáčky motoru.

3.5.1 Toyota Aygo

Obrázek 22 - Vozidlo Toyota Aygo zadní část

Obrázek 23 - Vozidlo Toyota Aygo – přední část.

Údaje o vozidle

Značka a typ vozidla:	**Toyota Yaris AB1 – KGB40**
Výrobce:	Toyota Motor Europe NV/SA
Rok výroby:	2014
Výrobní číslo:	JTDKGNEC30N033226
Modelový kód:	KGB40L-AHMGKW(2)
Zdvihový objem válců motoru:	998 cm^3
Maximální výkon motoru:	51 kW
Předepsané palivo:	benzín automobilový BA95 bezolovnatý
Typ motoru:	1KR
Provozní hmotnost:	940 kg
Celková hmotnost:	857,3 kg
Délka vozidla:	3455 mm
Šířka vozidla:	1615 mm
Výška vozidla:	1460 mm
Rozvor:	2340 mm
Druh karosérie:	hatchback
Počet dveří	5
Barva vozidla:	oranžová
Druh pohonu:	přední pohon
Druh převodovky	manuální 5-stupňová

3.5.2 Toyota Auris

Obrázek 24 - Vozidlo Toyota Auris zadní část

Obrázek 25 - Vozidlo Toyota Auris přední část

Údaje o vozidle

Značka a typ vozidla:	**Toyota AURIS E15UT – ZRE185**
Výrobce:	Toyota Motor Europe NV/SA
Rok výroby:	2014
Výrobní číslo:	SB1ZE3JE90E042629
Modelový kód:	ZRE185L-DWFDPW(1)
Zdvihový objem válců motoru:	1598 cm^3
Maximální výkon motoru:	97 kW
Předepsané palivo:	benzín automobilový BA95 bezolovnatý
Typ motoru:	1ZR
Provozní hmotnost:	1362 kg
Celková hmotnost:	1313,3 kg
Délka vozidla:	4560 mm
Šířka vozidla:	1615 mm
Výška vozidla:	1760 mm
Rozvor:	1460 mm
Druh karosérie:	hatchback
Počet dveří	5
Barva vozidla:	bílá
Druh pohonu:	přední pohon
Druh převodovky:	manuálna 5-stupňová

3.5.3 Dodge Caliber

Obrázek 26 - Vozidlo Dodge Caliber z boku

Obrázek 27 - Vozidlo Dodge – přední část.

Údaje o vozidle

Značka a typ vozidla:	**Dodge Caliber PK**
Výrobce:	Daimlerchrysler Corporation, USA
Rok výroby:	2008
Výrobní číslo:	1B3HBC8A57D350742
Modelový kód:	BBC8A - 74
Zdvihový objem válců motoru:	1968 cm^3
Maximální výkon motoru:	103 kW
Předepsané palivo:	Nafta motorová
Typ motoru:	BYL
Provozní hmotnost:	1500-1560 kg
Celková hmotnost:	1479,9 kg
Délka vozidla:	4415 mm
Šířka vozidla:	1800 mm
Výška vozidla:	1535 mm
Rozvor:	2635 mm
Druh karosérie:	hatchback
Počet dveří	5
Barva vozidla:	Tmavě modrá metal.
Druh pohonu:	přední pohon
Druh převodovky:	manuálna 6-stupňová

3.5.4 Volvo V60

Obrázek 28 – Volvo V60 přední část

Obrázek 29 – Volvo V60 zboku

Údaje o vozidle

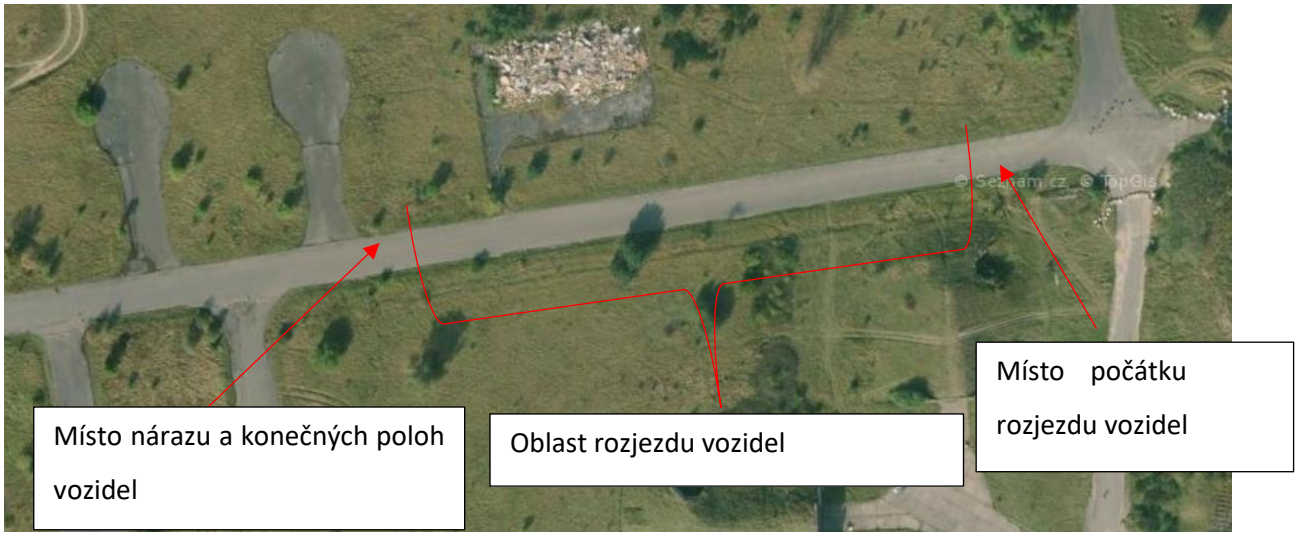
Značka a typ vozidla:	**Volvo V60 F**
Výrobce:	Volvo Car Corporation
Rok výroby:	2011
Výrobní číslo:	YV1FW84A1C1036783
Modelový kód:	FW84A1
Zdvihový objem válců motoru:	1560 cm^3
Maximální výkon motoru:	84 kW
Předepsané palivo:	Nafta motorová
Typ motoru:	D4162T
Provozní hmotnost:	1648 kg
Celková hmotnost:	1511,80kg
Délka vozidla:	4628 mm
Šířka vozidla:	1865 mm
Výška vozidla:	1479 mm
Rozvor:	2776 mm
Druh karosérie:	kombi
Počet dveří	5
Barva vozidla:	šedá
Druh pohonu:	přední pohon
Druh převodovky:	manuálna 5-stupňová

3.6 Nárazové zkoušky

3.6.1 Test 1

Jako první test byl zvolen boční náraz dvou paralelně jedoucích osobních vozidel v tentýž směru. Do pravých dveří vozidla Toyota Auris jedoucího v pomyslném levém pruhu komunikace rychlostí 50 km/h narazilo z boku vozidlo Toyota Aygo jedoucí v pomyslném pravém pruhu rovněž rychlostí 50 km/h. Obě tyto vozidla byly řízeny zaměstnanci USI Žilina.

Místo vykonávání crash testů bylo v areálu bývalého letiště v katastrálním území obce Milovice, okres Nymburk, Středočeský kraj, Česká republika. Povrch vozovky byl betonový a jevil známky opotřebení projevující se občasnými nerovnostmi či prasklinami. V době provedení zkoušky byla zvýšená oblačnost, světelné podmínky však nebyly zhoršené.



Obrázek 27 - fotografie místa z ptačí perspektivy

Při nárazu vozidel došlo k dostatečné změně rychlosti v čase, a tak systém EDR obou vozidel úspěšně zaznamenal údaje z nehodového děje.

Obrázek 28 - test 1 konečná poloha vozidel

Obrázek 29 – test 1 poškození vozidla Toyota Aygo

Obrázek 30 - test 1 poškození vozidla Toyota Aygo

3.6.2 Test 2

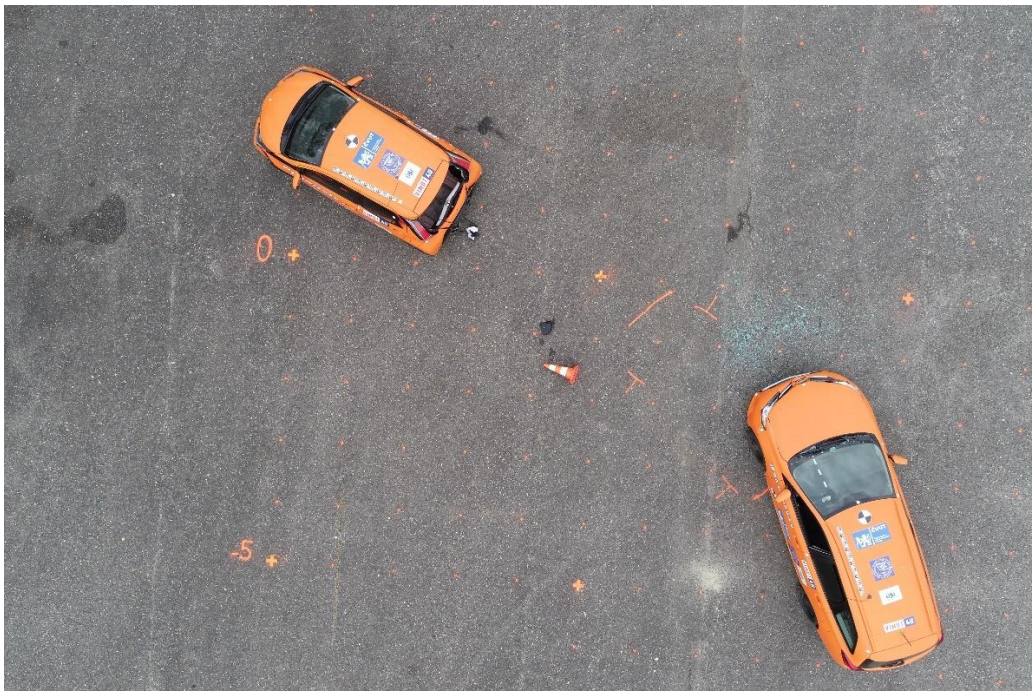
Druhým testem byl čelní náraz do levého zadního rohu brzděného vozidla. Jednalo se demonstraci situace, kdy řidič jedoucího vozidla v tomto případě Toyoty Aygo prudce zabrzdí a stočí volant vlevo ve směru jízdy. Řidič vozidla Toyota Auris jedoucí v těsném závěsu za vozidlem Toyota Aygo, buďto z důvodu nevěnování pozornosti řízení či kvůli nedostatku reakční doby pro vykonání úkonů vedoucích k zabránění nehodové události narazí do vozidla Toyota Aygo.

Obě tato vozidla byla řízena zaměstnanci ÚSI Žilina.

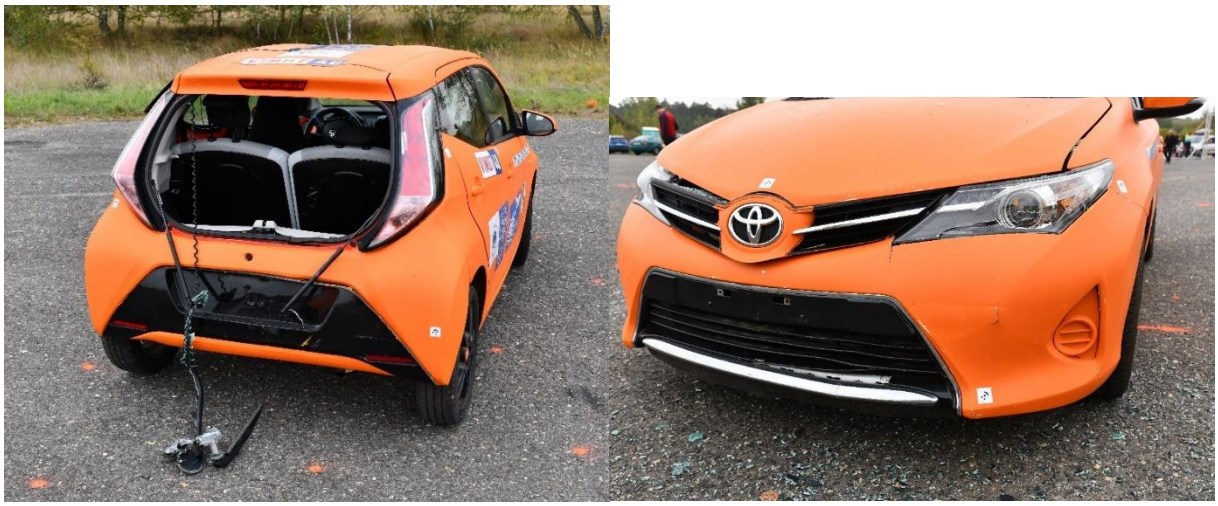
Při nárazu vozidel došlo k dostatečné změně rychlosti v čase, a tak systém EDR obou vozidel úspěšně zaznamenal údaje z nehodového děje. Dle těchto údajů bylo vozidlo Toyota Aygo brzděno z rychlosti 34 km/h až k úplnému zastavení, ke kterému došlo velmi těsně před okamžikem nárazu. Posledním údajem o rychlosti ze systému CDR je totiž hodnota 6 km/h v čase 0,5 s před nárazem a další už jen 0 km/h, přesně v čase nárazu. Celkově tento proces brzdění trval 5 s.

Vozidlo Toyota Auris se pohybovalo původní rychlostí 36 km/h. Od času 2,7 s před nárazem začalo dle vyčtených údajů ze systému EDR snižovat svou rychlost na 23 km/h, což byla také rychlost nárazu. Všechny tyto uvedené údaje odpovídají realitě zkoušky.

Místo konání a podmínky počasí byly totožné jako u předchozího testu.



Obrázek 31 – test 2 konečná poloha vozidel

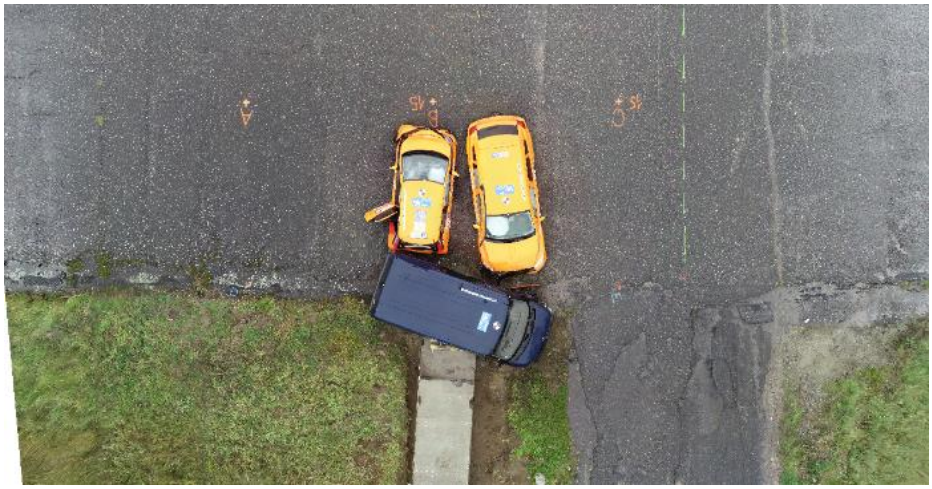


Obrázek 32 – test 2 deformace vozidel Toyota Aygo a Toyota Auris

3.6.3 Test 3

Cílem tohoto testu bylo provedení nárazové zkoušky vozidel Dodge Caliber a Toyota Aygo. Vozidlo Dodge Caliber bylo roztaženo na kolejnici pomocí kladky a ocelového lana protipohybem řízeného vozidla Škoda Superb na nárazovou rychlost 49 km/h. Došlo tak ke střetu s přídí vozidla Toyota Aygo, které stálo v klidu několik metrů za koncem kolejnice.

Místo konání, počasí a povětrnostní podmínky byly velmi podobné jako u testů předchozích.



Obrázek 33 - test 3 konečné polohy vozidel

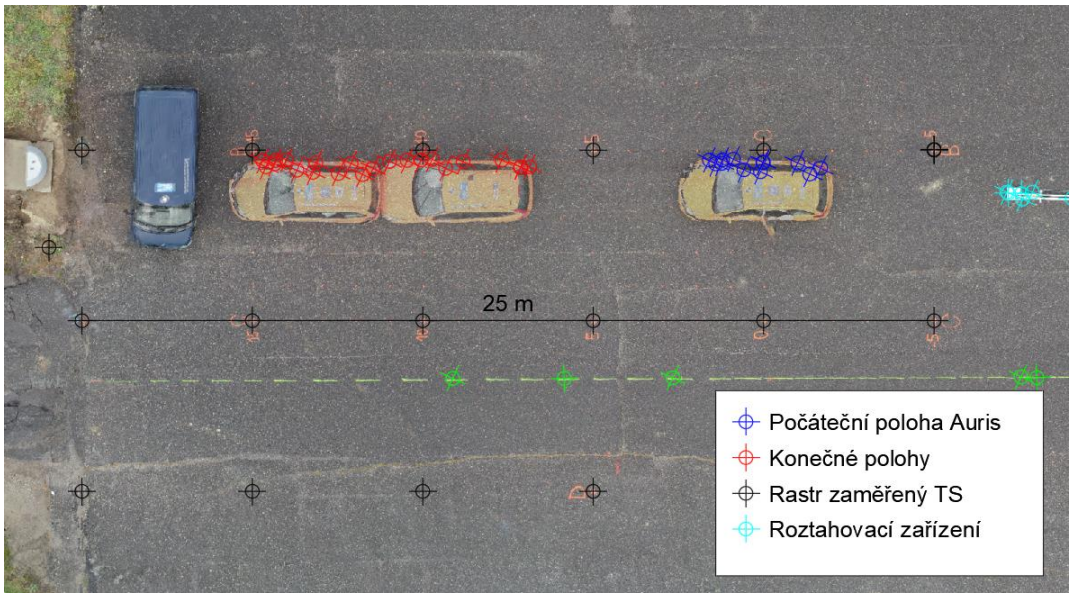
Obrázek 34 - deformace vozidla Toyota Auris po testu 3

Obrázek 35 - deformace vozidla Dodge po testu 3

3.6.4 Test 4

Cílem tohoto testu bylo provedení nárazové zkoušky vozidel Volvo V60 a Toyota Auris. Vozidlo Volvo V60 bylo stejnou metodou jako u předchozího testu roztaženo na kolejnici pomocí kladky a ocelového lana protipohybem řízeného vozidla Škoda Superb na nárazovou rychlost 48 km/h. Došlo tak ke střetu se zádí vozidla Toyota Auris, které stálo v klidu několik metrů za koncem kolejnice. U vozidla Auris bylo úmyslně sníženo napětí na baterii na hodnotu 10,34 V s cílem ověřit funkčnost systému EDR i v případech, kdy na vozidle dojde k závadě na elektroinstalaci (např. vlivem předcházejícího nárazu či selháním na obvodu elektroinstalace). V rámci tohoto testu zároveň prakticky ověřován navržený metodický postup. Zohledněny byly všechny navrhované kroky včetně případné potřeby externího napájení, demontáže jednotky EDR z vozidla apod. Výsledky tohoto ověření byly promítnuty do finální podoby metodiky.

Místo konání, počasí a povětrnostní podmínky byly velmi podobné jako u testů předchozích.



Obrázek 36 - Sloučené ortofoto s GSD 1cm/px a výstupy z totální stanice zobrazující počáteční polohu vozidla Auris a konečné polohy vozidel po střetu

Obrázek 37 Polodetail a detailní poškození vozidel – test 4

4 Zpracování datového výstupu

Samotných testů bylo dle předpokladů a projektové žádosti provedeno pět, a to s různou konfigurací a s vozidly, která umožňují vyčtení nehodových dat a která budou u jednotlivých testů detailně popsána. Za účelem ověření možnosti získání dalších pro analýzu nehody významných či zajímavých údajů byl před každým testem například spuštěn stěrač předního okna, ukazatel směru či světelné výstražné znamení. Z dále uvedeného seznamu u jednotlivých vozidel je však patrné, že kromě informací o vývoji některých parametrů pohybu či zapnutí bezpečnostních pásů, aktivaci airbagů nebo vybraných funkcí (systémy ABS či ESP) nebylo možné tyto informace získat.

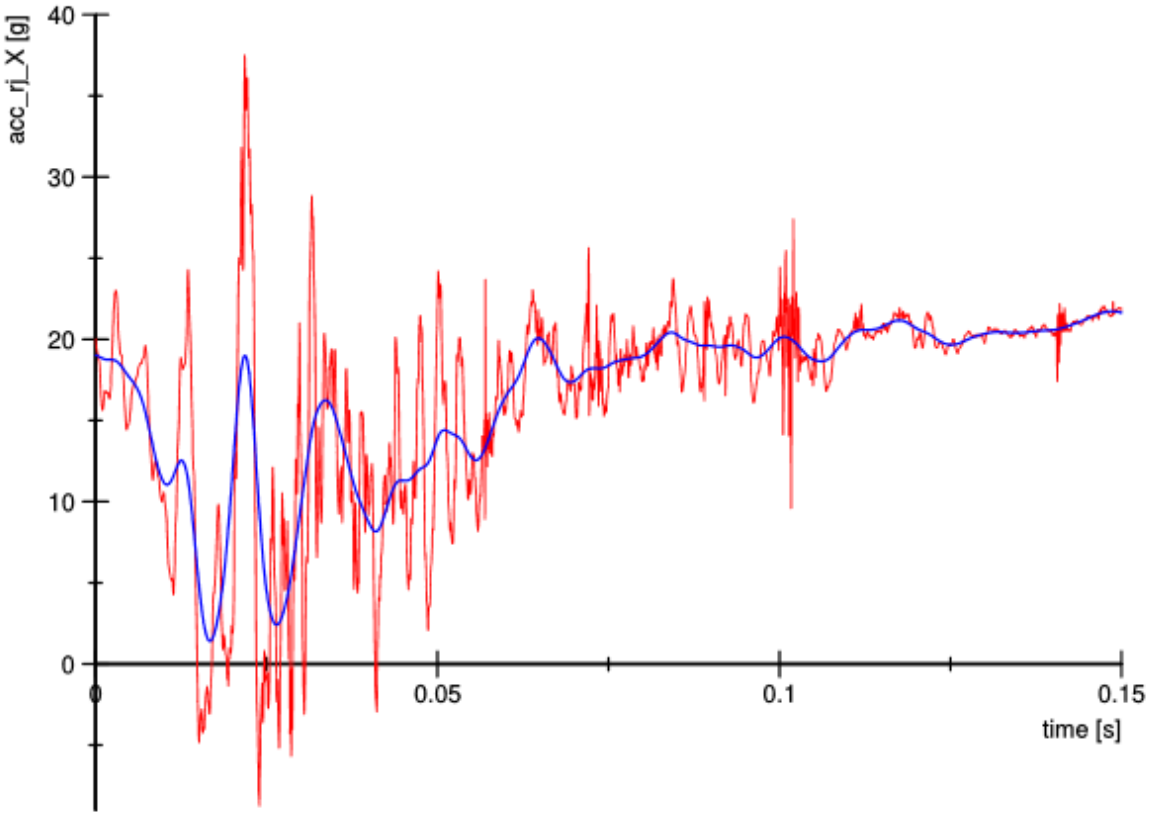
Po ukončení měření byla data z referenčního zařízení systému Krypton uložena na měřícím PC v podpůrném softwaru Dewesoft. V tomto programu lze rovněž mimo jiné nastavit konfiguraci kanálů a vlastnosti jejich signálu pro jednotlivá měření. Program nabízí možnost exportu uložených dat do různých datových formátů, z nichž byla vybrána možnost .csv. Díky funkce náhledu průběhu signálu v jednotlivých kanálech je možné v programu identifikovat časový horizont nárazu a od něj pak oprostit zbytek naměřených nadbytečných a nepotřebných dat vzniklých spuštěním a vypnutím měření s několika minutovým odstupem před a po nárazu, čímž se sníží velikost vyexportovaného souboru a zjednoduší a zrychlí následná práce s daty.

Dále byla data nahrána do programu Diadem, který je součástí balíčku National Instruments LabView a umožňuje pohodlnou práci se zpracováváním dat z nárazových zkoušek, pro což byl také přímo vyvinut. Po uploadu dat z konkrétních měření je třeba posunutí časové osy tak, aby okamžik nárazu byl s co největší možnou přesností v čase nula. K tomuto poslouží data získaná z napěťového triggeru, jejichž kanál v grafickém rozhraní programu promítneme na osu Y a časový průběh v sekundách pak na osu X. Pomocí funkce ukazatele lokálního maxima grafu identifikujeme přejetím jezdce do oblasti prudké změny napětí čas této změny. Toto je zároveň čas prvního dotyku kolidujících partnerů. Proto tuto hodnotu posléze použijeme při aplikaci funkce „offset“, pomocí které posuneme časovou osu do záporu právě o velikost této hodnoty, tudíž okamžik nárazu bude v požadovaném čase nula, doba před nárazem bude na záporné ose a doba po nárazu na ose kladné.

Nyní bylo třeba vhodnými filtry vyhladit průběh signálu pro odstranění šumu. Program Diadem pro to nabízí speciální funkce stvořené přesně pro účely filtrace signálu dle norem nárazových zkoušek. Jednou z nich je „CFC6O“ sloužící pro filtraci dat o zrychlení získaných z akcelerometrů umístěných na karoserie vozidla.

Vzhledem k tomu, že každý z akcelerometrů měří data s určitým offsetem, tedy rozdílem o konstatní hodnotu od reálné hodnoty zrychlení na vstupu, je třeba u každého kanálu zrychlení tyto data posunout zpět, aby odpovídaly realitě. Z logického předpokladu o nulové hodnotě zrychlení v době, kdy byl automobil v klidu, tedy na konci měření se pomocí již použité funkce „offset“ s podpůrnou funkcí „substract last channel value“ posune celý signál o hodnotu poslední naměřené hodnoty.

Nakonec se pomocí funkce „resultant“ spočte pro každý akcelerometr výslednice zrychlení z jeho jednotlivých os X, Y, Z.



Obrázek 38 - Ukázka neupravené (červená) a filtrované datové řady (modrá)

Protokol CDR poskytuje vždy data z několika posledních zásadních nehodových událostí vozidla. Zpravidla se jedná o Most recent event (poslední událost), 1st Prior event (předposlední událost), 2nd Prior (druhá předposlední událost) a 3rd Prior event (třetí předposlední událost). Mimo jiné je u každé z těchto událostí uvedena tabulka obsahující aktuální změnu rychlosti v daný čas vůči rychlosti zaznamenané bezprostředně před nárazem. Tento záznam je vždy v té konkrétní souřadnicové ose,

v které byla změna rychlosti nejrazantnější. U čelních nárazů tak zpravidla byla ukládána data vztažená k ose X a u bočních nárazů k ose Y.

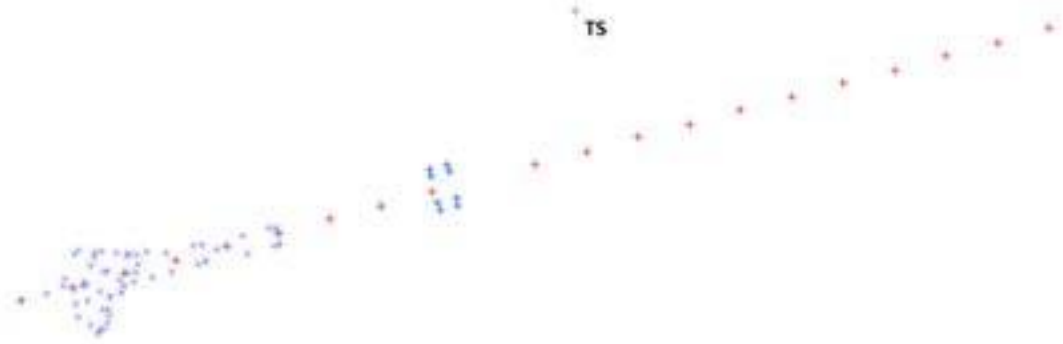
Při zpracování těchto dat byl rovněž použit program NI Diadem, do kterého byla z dokumentu protokolu CDR nakopírovaná data o deltě rychlosti a času. Tyto veličiny byly přepočítány z původních jednotek na jednotky námi potřebné, aby mohly být dále bezchybně zpracovány. Pro výpočet zrychlení byla v programu zvolena funkce „differentiate“ která je schopná derivovat určitý kanál dle času. Tudíž byl využit základní fyzikální vztah:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Kde *a* značí zrychlení v $m.s^{-2}$, *v* rychlost v m/s^{-1} a *t* čas v *s*.

A byl tak z průběhu rychlosti v čase vypočítán průběh zrychlení v čase. Poté už byly jen hodnoty přepočítány do jednotek zrychlení *g* a mohly tak být dány do směrodatného kontrastu s daty z referenčního zařízení.

Za účelem vyhodnocování dalších aspektů dynamických testů bylo využito dříve uvedených geodetických měření, laserového skenování a fotogrammetrie. Geodetické zaměření počátečních a konečných poloh v průběhu testů bylo prováděno za pomoci digitální totální stanice Topcon GPT-7003i. Výstupem tak byla výběrová řídká bodová mračna s velmi vysokou mírou přesností určených poloh automobilů a stop po testech.



Obrázek 39 - Ukázka zaměření totální stanicí (test 4 roku 2017, výchozí i konečné polohy)

Fotogrammetrická měření byla prováděna jak ve formě pozemní fotogrammetrie, tak letecké fotogrammetrie z nízkých výšek. Pro pozemní fotogrammetrická měření byl využit full-frame digitální

fotoaparát Nikon D600 s fixním objektivem Sigma s ohniskovou vzdáleností 35mm. Primárním výstupem pozemní fotogrammetrie byla zejména dokumentace výsledných poškození na jednotlivých automobilech v průběhu testů. Letecká fotogrammetrie byla prováděna za pomoci bezpilotního prostředku DJI Phantom 4 Pro. Výstupem těchto měření byly, oproti pozemní fotogrammetrii, zejména ortografické snímky počátečních a konečných poloh při testech, které tak doplňovali data získaná za pomoci totální stanice. Výsledné snímky pořízené pro fotogrammetrické měření byla vyhodnocena za využití principů digitální obrazové korelace v programu PhotoScan Profesional od firmy Agisoft. Výsledná složená ortofota s geodeticky zaměřenými polohami se nacházejí níže.

Laserové skenování bylo prováděno za pomoci laserového scanneru FARO Focus. Výsledná hustá bodová mračna sloužila zejména k dokumentaci celkové situaci po testech a zhodnocení výsledných deformací na jednotlivých automobilech.

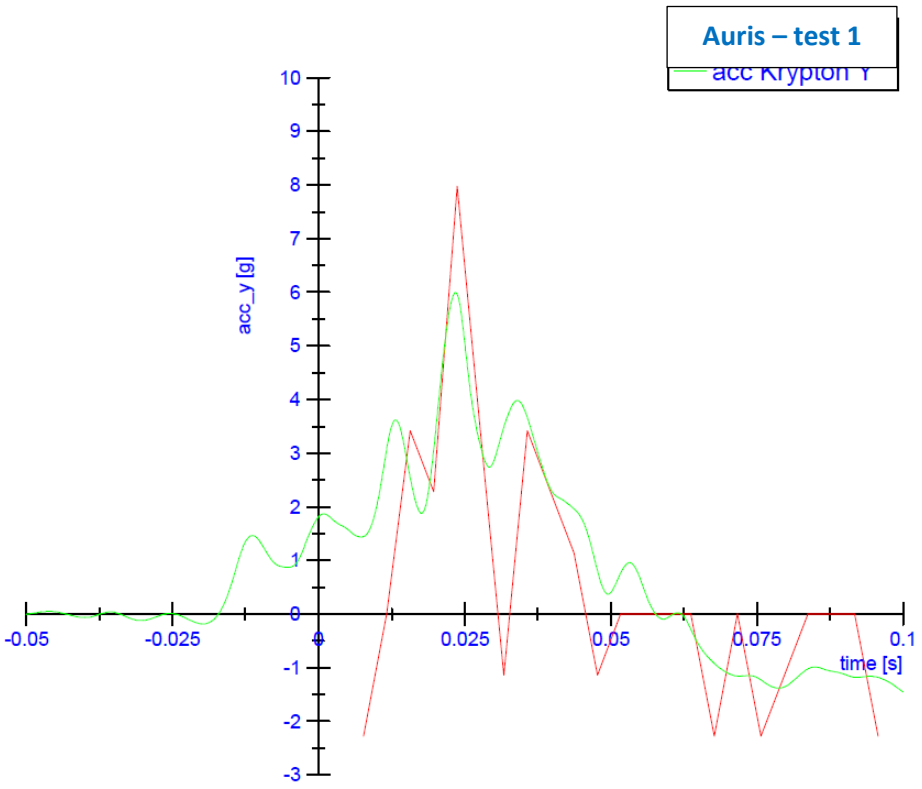
Zjištění těsně přednárazové a nárazové rychlosti bylo realizováno pomocí dvou přístupů. Nárazová rychlost byla určována na základě snímků z rychlokamerového záznamu. Každý z crashtestů byl snímán kamerami standardními nebo s vyšší frekvencí záznamu, která však nedosahuje takových hodnot jako vysokorychlostní kamera.

5 Analýza průběhů zrychlení při jednotlivých testech

5.1 Test 1

Jelikož se jednalo o náraz boční, tak pro porovnání jeho průběhu byla výjimečně vybrána pouze data o zrychlení v ose Y, protože právě ta vykazují největší směrodatnost.

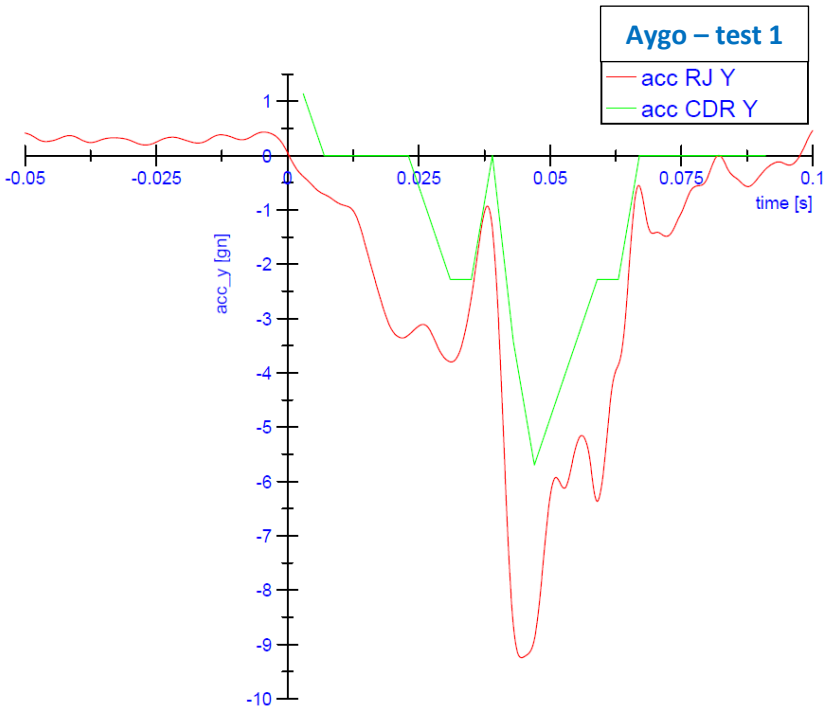
Dle grafického zobrazení těchto získaných dat lze konstatovat, že tvar křivek průběhu zrychlení ze zařízení EDR a referenčního zařízení Krypton je alespoň částečně souhlasný. Podstatný negativní vliv na tvar křivky průběhu zrychlení ze zařízení EDR má fakt, že toto zařízení zaznamenává data o rychlosti s výrazně nižší frekvencí než referenční zařízení Krypton, a tak na rozdíl od něj může místy vynechat určitý „peak“, ke kterému dojde v časové rozmezí mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami.



Obrázek 40 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 1)

Na druhou stranu zařízení Krypton vykazuje patrnou odchylku, jelikož akcelerometry na něm použité byly umístěny ve středu vozidla blízko řídící jednotky. Senzory, ze kterých čerpal data systém EDR,

jsou však uloženy na bočních sloupcích vozidla na straně nárazu, a tak díky většímu momentu síly zaznamenají podstatně vyšší hodnotu zrychlení oproti systému Krypton. U vozidla Aygo je tomu naopak, zřejmě z důvodu umístění senzoru zrychlení EDR v pravé části vozidla, přičemž akcelerometr systému Krypton byl umístěn blíže ke středu stejně jako u vozidla Auris. Tudíž u vozidla Auris, které bylo naraženo zprava bylo maximální naměřené zrychlení systémem Krypton nižší než systémem EDR a u vozidla Aygo, které narazilo zleva naopak vyšší. V případě vozidla Auris se jedná o rozdíl zhruba 2g a v případě vozidla Aygo až téměř k 4g.



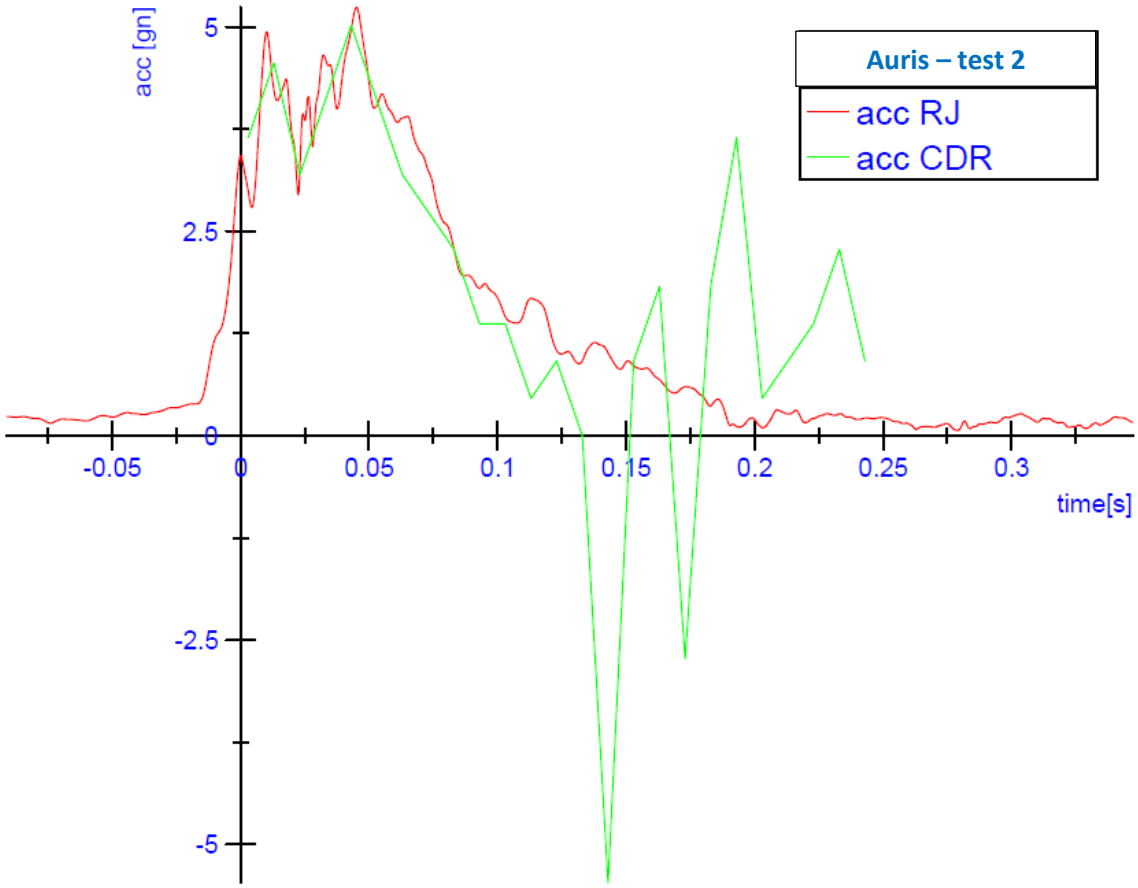
Obrázek 41 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo

5.2 Test 2

5.2.1 Průběh zrychlení vozidla Auris

V tomto případě nelze říci, že by si průběhy obou křivek vzájemně úplně odpovídaly. Křivky se překrývají mezi okamžikem nárazu až do času 0,1 s, poté však dochází k těžce vysvětlitelnému zvratu, kdy se hodnoty vyčtené ze systému CDR začínají pohybovat v záporném kvadrantu, prudce klesají a mezi časy 0,1 s a 0,15 s nabydou hodnoty až přes - 5g. Poté opět stoupají do kvadrantu kladného až k hodnotě 4g, dále pak dochází k podobné kmitání. Průběh v těchto okamžicích mezi časy 0,1 s a 0,25 s, jakoby připomínal rezonování kolem určité lineární funkce s předpisem $y = ax - b$. Dle hodnot z referenčního zařízení, které v tomto případě vzhledem ke své celistvosti a překrytí v prvopočátku

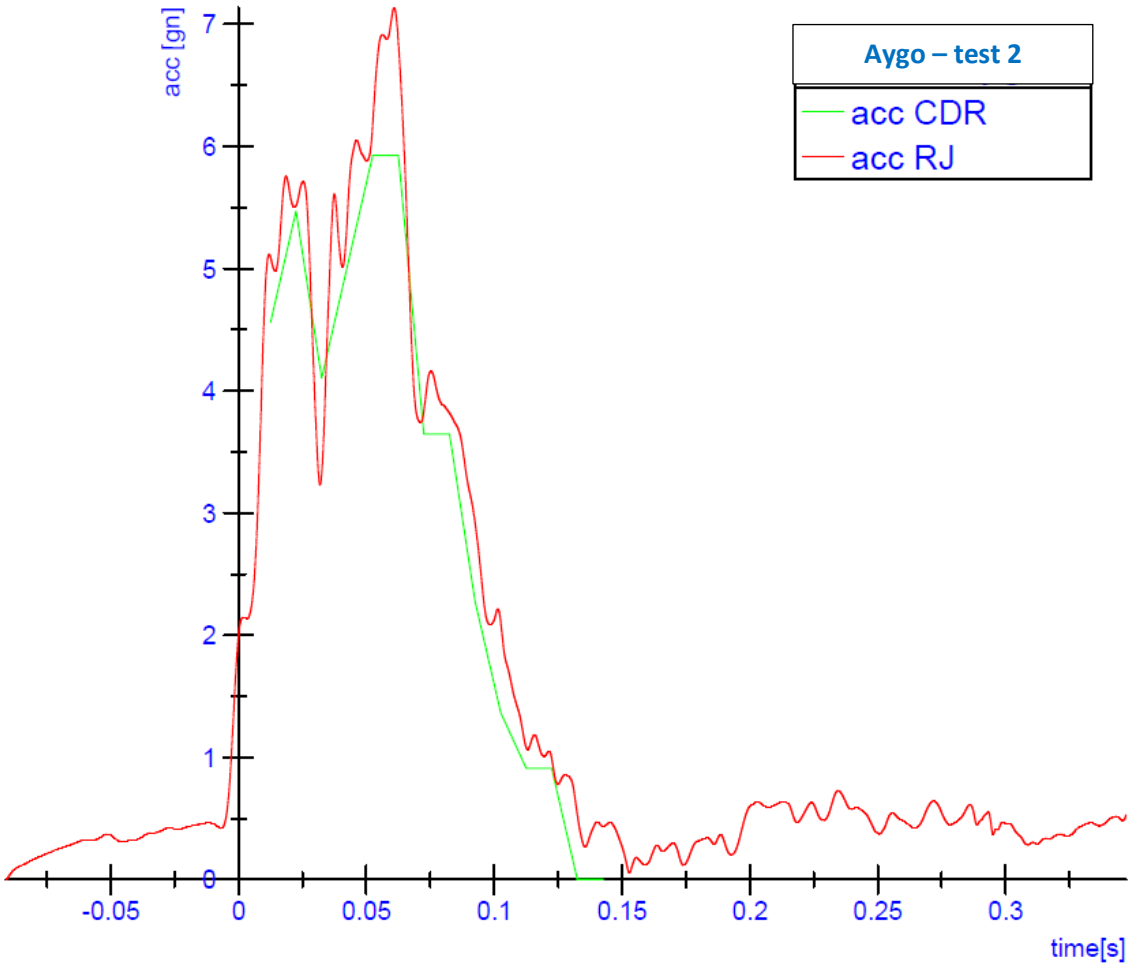
měření rozhodně neselhalo, došlo k peakům, jejichž hodnoty se od reality liší až o více než 5g. Toto selhání může tedy negativně ovlivnit analýzu nehod v soudně znalecké praxi.



Obrázek 42 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 2)

5.2.2 Průběh zrychlení vozidla Aygo

Zde lze konstatovat, že došlo téměř k dokonalému překrytí. Ovšem opět se projevila jedna ze slabin jednotky EDR a to neschopnost identifikace absolutního peaku průběhu zrychlení přičiněná nízkou frekvencí snímání. V případě velmi krátkých časových oblastí s prudkým nárustem a poklesem hodnot dochází tedy skutečně pro senzory EDR k zastínění reálné hodnoty a zaznamenání dat s určitou odchylkou od oné maximální hodnoty. V tomto případě se však jedná o odchylku 1 g, což oproti ostatním měřením není až tak významné.



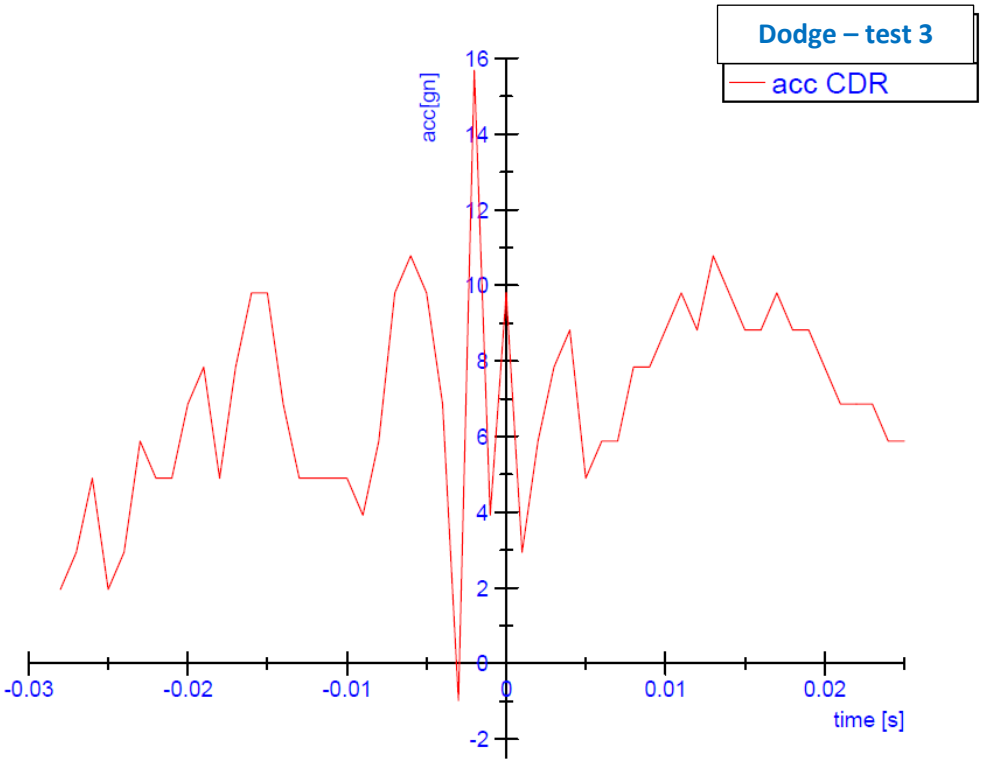
Obrázek 43 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo (test 2)

5.3 Test 3

5.3.1 Průběh zrychlení vozidla Dodge

Z důvodu poruchy referenčního zařízení Krypton se v případě tohoto vozidla zachoval pouze průběh zrychlení ze systému EDR, a tak lze těžko posoudit validaci těchto naměřených dat. Vzhledem ke zkušenostem s nárazy při této rychlosti lze však empiricky vyvodit, že alespoň velikosti naměřených hodnot odpovídají realitě. O jejich průběhu v čase to však s jistotou konstatovat nelze. Zarážející je rovněž peak sahající k až k hodnotě 16 g několik milisekund před časem 0 s, tedy okamžikem nárazu. Resp. veškerá data před časem nárazu vykazují hodnoty v tomto čase pravděpodobně nereálné. Tudíž data vykazují jistý offset v ose *x*. Mohlo by tomu tak býti z důvodu odlišného umístění senzoru detekujícího první okamžik nárazu a senzoru měřícího samotný průběh zrychlení. Ovšem to by znamenalo, že naměřené hodnoty zrychlení nastanou v časovém odstupu za okamžikem nárazu, nikoliv před. A tak se nabízí možnost, že vozidlo bylo prvně konfrontováno s částí, na které není senzor prvního

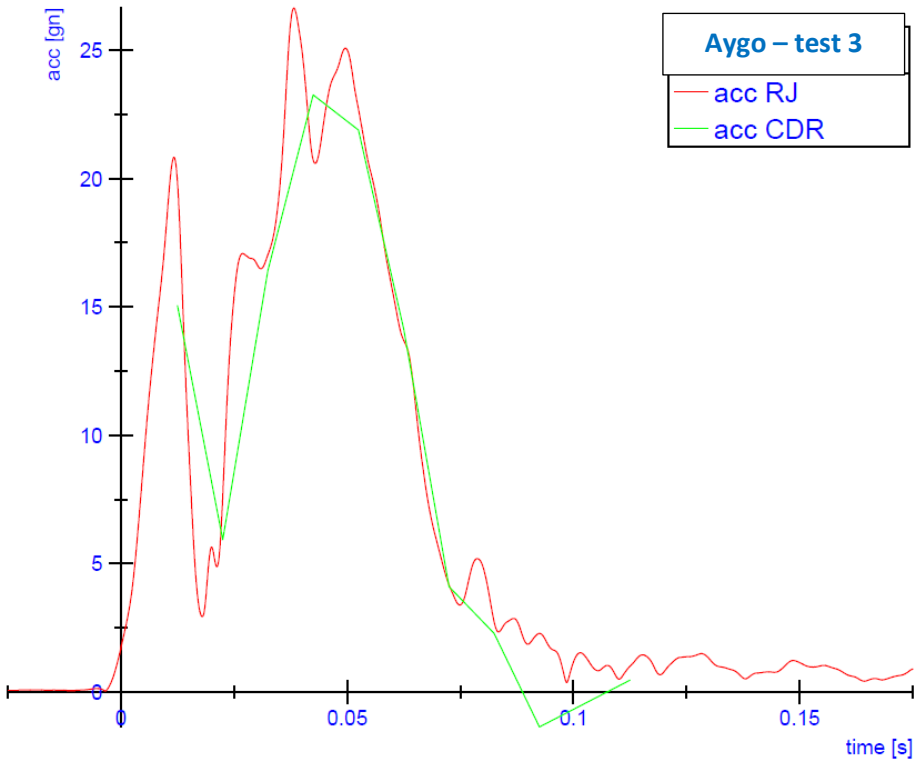
doteku umístěn, a ten byl tak spuštěn až po následné deformaci s určitým odstupem v řádech milisekund.



Obrázek 44 - Průběh hodnot zrychlení dle CDR u vozidla Dodge Caliber (test 3)

5.3.2 Průběh zrychlení vozidla Aygo

Průběh zrychlení ze zařízení EDR a referenčního zařízení Krypton vykazuje v tomto případě velmi uspokojivou shodu. Až na opět se opakující problém s lehkou nepřesností maximálních hodnot si průběhy křivek vzájemně odpovídají, místy dokonce téměř splývají. Velikost maximálního zrychlení je zde o 10 g vyšší oproti maximální velikosti zrychlení vozidla Dodge, což vzhledem ke konstrukci a hmotnosti obou vozidel dává dle vzorce $F = m.a$ (fyzikálního zákonu síly) patřičný smysl.

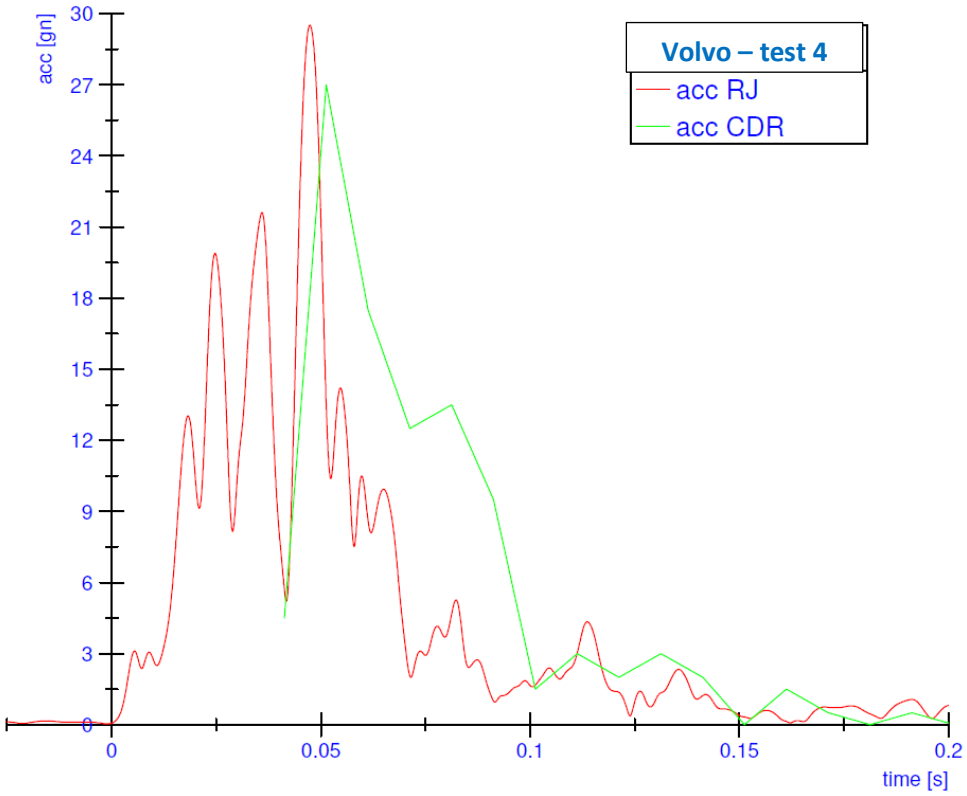


Obrázek 45 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo (test 3)

5.4 Test 4

5.4.1 Průběh zrychlení Volvo V60

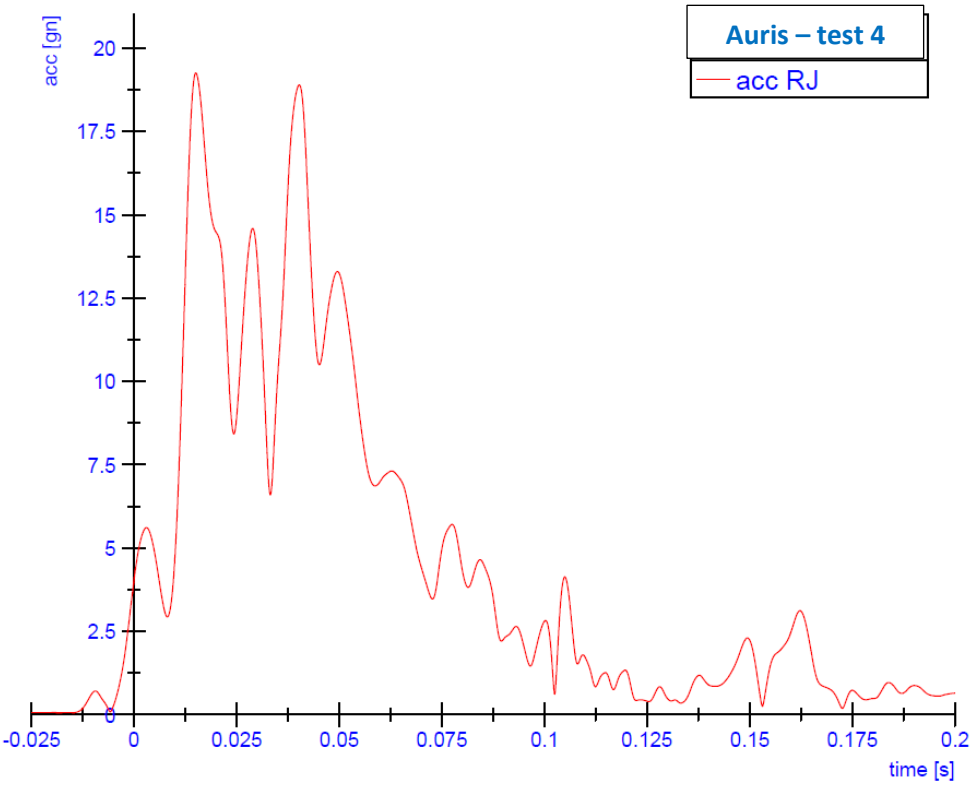
Vývoj zrychlení v čase jednotlivých zařízení je v tomto případě rovněž odpovídající. Křivka průběhu získána ze systému EDR vykazuje sice oproti referenčnímu zařízení jistou odchylku a deformaci průběhu, avšak nikterak významnou pro účely zpětné analýzy nehodových dat.



Obrázek 46 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Volvo V60 (test 4)

5.4.2 Průběh zrychlení Toyota Auris

Při této zkoušce nedošlo ke spuštění záznamu dat zařízení EDR u vozidla Toyota Auris. Dle referenčního zařízení Krypton je však patrné, že bylo při nárazu dosaženo dostatečného zrychlení, které by k zahájení zápisu mělo vést. Je tedy otázkou, zda k tomuto selhání došlo z důvodu omezené kapacity zápisu v důsledku nehod na tomto vozidle již provedených, či zda poškození z předchozích nárazových testů nemohlo zasáhnout do funkčnosti senzorů či celého systému EDR.



Obrázek 47 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 4)

6 Ověření a zhodnocení výsledků v prostředí softwaru Virtual Crash

6.1 Základní poznatky o programu Virtual Crash

Virtual crash je program pro simulaci dopravních nehod vozidel a chodců. Podobně jako jiné programy sloužící pro rekonstrukci dopravních nehod poskytuje Virtual CRASH modelování střetu a postřetového pohybu s postupnou optimalizací vstupních hodnot. Jeho výhoda tkví ve vývoji softwaru, který umožňuje stále složitější výpočty simulací v reálném čase na PC. Výsledky simulace lze zobrazit pomocí výstupu v podobě plánu v měřítku, animace průběhu nehody v 3D perspektivě, či diagramů a tabulek sloužících k popisu, ověření či interpretaci řešení.

Simulace střetu je vytvářena pomocí dopředných metod, tedy od místa střetu do konečných poloh. Software pro tento výpočet využívá tzv. impulsně – rázový model, který pomocí jediné výslednice sil substituuje všechny nárazové síly působící v deformovaném profilu poškozené části vozidla. Tato výslednice sil prochází tzv. bodem rázu.

Lze tedy konstatovat, že se jedná a výrazné zjednodušení vůči reálné situaci. Vzhledem k tomu, že účinek výsledné síly závisí na čase, lze jej označit za impuls síly. Velikost tohoto impulsu je mj. stanovena hodnotou koeficientu restituce a jeho směr je dán rovinou rázu, ve kterém probíhá případný skluz. Směr impulsu se vždy vyskytuje v oblasti tzv. třecího kuželu.

Při nárazu dvou vozidel je impuls síly na vozidlo 1 dán výrazem:

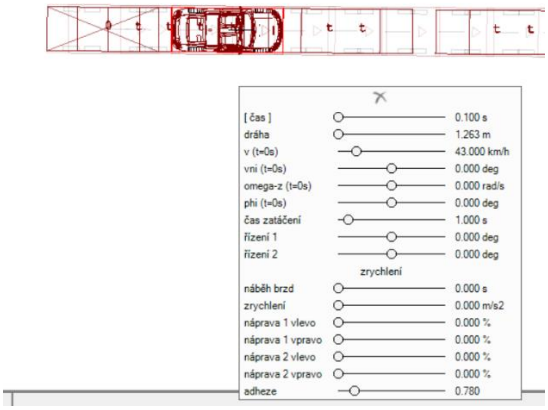
$$|\bar{J}_1| = \frac{-(1+\varepsilon)\cdot \bar{v}_{Rel,i}^{P} \cdot \hat{n}}{\left(\frac{\hat{J}_1}{\bar{m}} + \frac{\bar{r}_1 \times \bar{J}_1 \times \bar{r}_1}{I_1} + \frac{\bar{r}_2 \times \bar{J}_1 \times \bar{r}_2}{I_2}\right)\cdot \hat{n}}$$

Kde $\bar{v}_{Rel,i}^{P} = \bar{v}_{1,f}^{P} - \bar{v}_{2,f}^{P}$ je počáteční relativní rychlost v okamžiku prvního kontaktu vozidel, $\bar{r}_1$ je vektor směřující od těžiště vozidla 1 do bodu kontaktu vozidel, $\bar{r}_2$ je vektor směřující od těžiště vozidla 2 do bodu kontaktu vozidel, I_1 je moment setrvačnosti vozidla 1, I_2 je moment setrvačnosti vozidla 2, $\hat{J_1}$ je jednotkový vektor hlavního směru síly vozidla 1, $\hat{n}$ je normálová osa kolize, ε je koeficient restituce a $\bar{m}$ je celková hmotnost systému. [18] [19] [20]

6.1 Základní nástroje a formy výstupu programu Virtual CRASH

6.1.1 Kinematické parametry vozidel

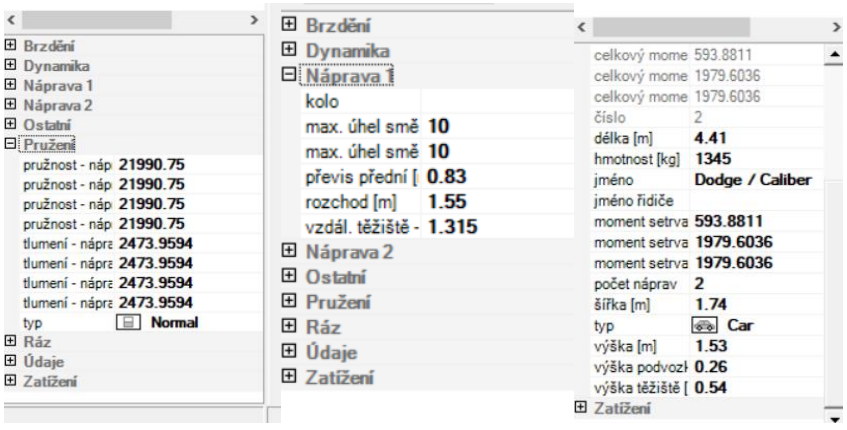
Po přidání vozidel z galerie do prostředí programu lze ovládat jejich pohyb za pomocí parametrů zobrazených na obrázku níže. Vozidlu je možné přiřadit počáteční rychlost a směr. Následně se zobrazí jeho trajektorie, která při posouvání myši umožňuje zjištění polohy vozidla v konkrétním čase. V každém časovém okamžiku či v každém bodě trajektorie lze pak měnit parametry mající vliv na kinematiku vozidla a ovládat tak jeho následný pohyb.



Obrázek 48 - kinematické parametry

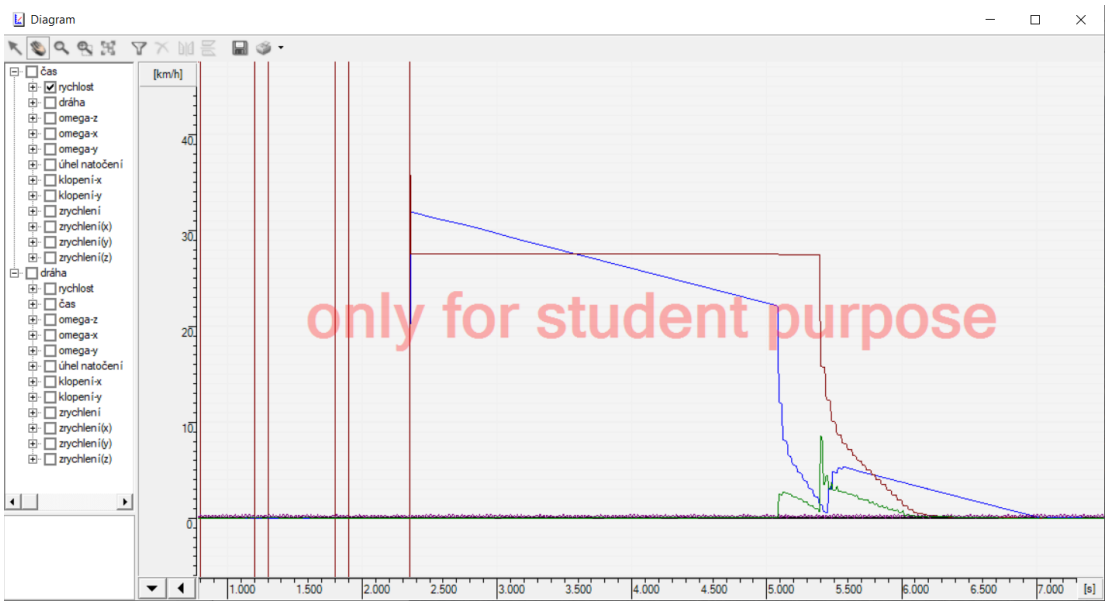
6.1.2 Dynamické parametry vozidel

Dále lze u každého z vozidel editovat i vlastnosti související s jeho dynamikou. Tedy parametry spjaté se silovým působením. Jedná se konkrétně například o hmotnost, těžiště, pružení, vlastnosti náprav, koeficient restituce a jiné. Toto nastavení je v čase neměnné.



Obrázek 49 - dynamické parametry vozidla

Při zkřížení trajektorií vozidel či objektů dojde automaticky k výpočtu na základě, kterého program vyhodnotí postřetový pohyb. Výstupem pak může být 3D video animace, která napomáhá reálné představě průběhu nehodového děje, dále pak diagramy zobrazující závislost veličin jako zrychlení, rychlost, dráha, klopení, klonění na čase. Stejné údaje lze z programu vyexportovat i formou tabulek. Dále lze získat i protokol obsahující všechny vstupní parametry, které byly v simulaci použity.



Obrázek 50 - příklad diagramu závislosti dráhy na čase

Virtual Crash 2.2 protokol; licence: CVUT - FAKULTA DOPRAVNI - student

vozidlo/překážka: **1 - Toyota / Aygo 1.0i**, řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	180.000	0.000	0.000	169.350
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	180.000	0.000		-8.260	89.946	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	0.000	0.000	0.540	19.612	-1.941	0.540

vozidlo/překážka: **2 - Dodge / Caliber**, řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	43.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.609
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	0.000	0.000		-167.448	-0.413	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-34.150	0.200	0.540	20.955	1.963	0.540

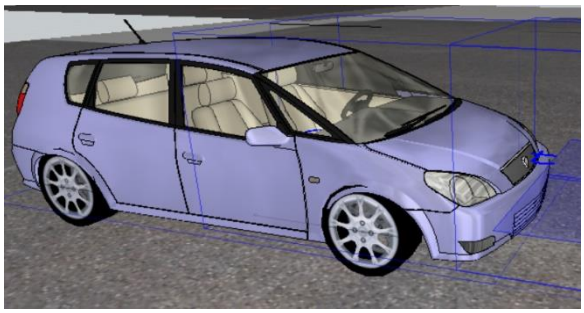
vozidlo/překážka: **3 - building-01**	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.435		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-2.985	-0.077	0.000	-2.931
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-2.985	0.000		-86.418	-81.798	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	-0.042	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	26.491	-0.451	0.500	26.490	-0.812	0.499

Obrázek 51 - ukázka protokolu

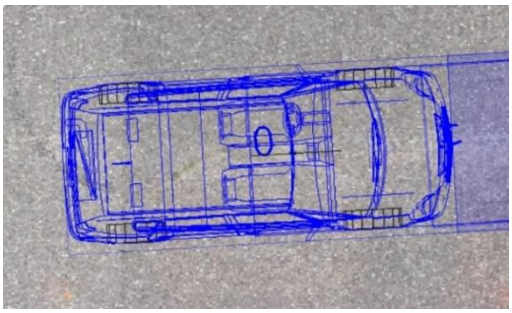
6.2 Popis jednotlivých simulací a jejich výsledků

6.2.1 Test 2 – postup tvorby simulace

Na základě dat o rychlostech v intervalech 0,5 s, vyčtených pomocí zařízení CDR byly vypočteny zrychlení v jednotlivých časových úsecích před nárazem vozidel a vloženy jako vstupní údaje pro simulaci do programu Virtual CRASH. Vzhledem k tomu, že se vozidla nepohybovala pouze přímočarým pohybem, bylo třeba vyčíst a v simulaci zohlednit také natočení kol obou vozidel v daných okamžicích. Protokol CDR však poskytuje údaje pouze ohledně úhlu natočení volantu, program Virtual CRASH nicméně přijímá pro výpočet simulace jen data ohledně úhlu natočení kol vozidla. Tyto hodnoty lze sice vzájemně převést, avšak při této operaci vzhledem k dřívějšímu poškození vozidla docházelo k vyšším nepřesnostem, a tak je směrodatný pouze poměr jednotlivých natočení v určitých okamžicích.

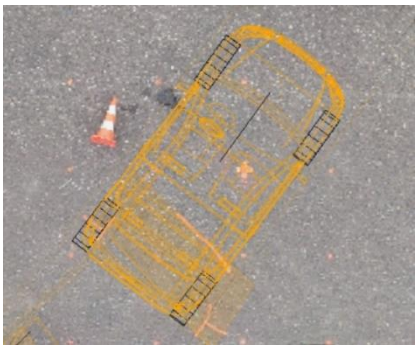


Obrázek 52 – 3D Model Toyoty Opa nahrazující Toyotu Auris v prostředí programu Virtual CRASH



Obrázek 53 - fyzikální 2D model Toyoty Auris v prostředí programu Virtual CRASH

Obrázek 54 – 3D Model Toyoty Corolla nahrazující Toyotu Aygo v prostředí programu Virtual CRASH

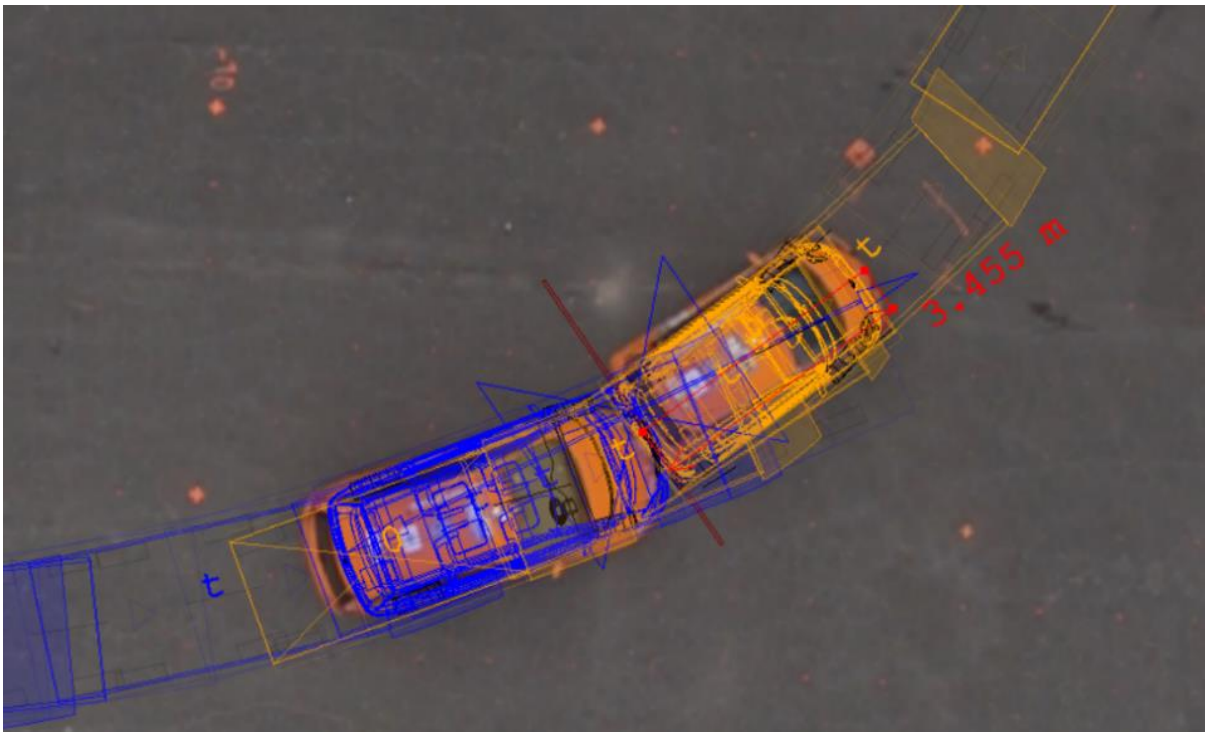


Obrázek 55 - fyzikální 2D model vozidla Toyota Aygo v prostředí programu Virtual CRASH

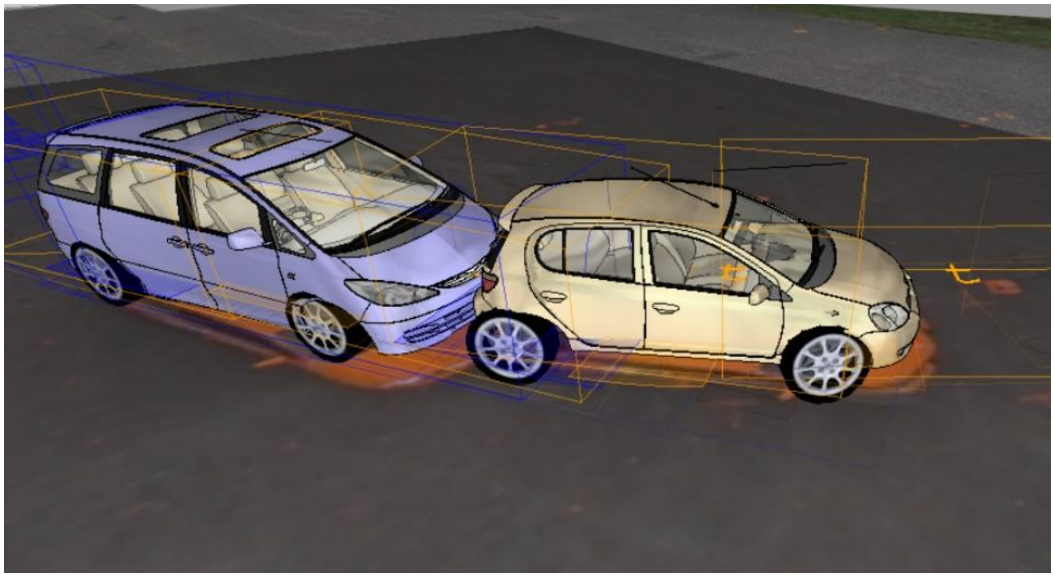
Pro směrové navedení vozidla do konečných poloh bylo tedy využito spíše bitmapových podkladů z kamerového záznamu z ptačí perspektivy, pomocí kterých byla dodržena trajektorie vozidel. Vzhledem k tomu, že při tomto testu byla v pohybu obě vozidla, posloužil bitmapový podklad rovněž k zavedení obou vozidel do stejného časoprostoru. Z kamerového záznamu byla vybrána počáteční poloha obou vozidel ve stejný okamžik a odečten čas od střetu, snímek tohoto okamžiku byl pak použit jako vstupní.

Smyslem této simulace bylo zjištění, zda na základě předstřetových dat o rychlosti ze systému CDR je fyzicky možné, aby vozidla po střetu dojela do konečných poloh. A také, zda průběh postřetové rychlosti vyprodukovaný výpočtem programu Virtual CRASH odpovídá průběhu reálných postřetových rychlostí získaných trackováním rychlokamerového záznamu. Tzv. trackování je metoda, při které se měří pohyb objektu ve videozáznamu na základě změny v pixelech s definovanou reálnou geometrickou délkou. [21]

V programu Virtual CRASH je třeba rozlišit dva typy modelu vozidel. Jeden model je tzv. fyzikální, zahrnuje konstrukční vlastnosti vozidla, jako geometrické parametry, pružení, hmotnost, těžiště, rozchod, apod. Druhý model je model čistě grafický a znázorňuje podobu vozidla ve 3D simulaci, jeho účel je však pouze estetický. Databáze modelů fyzikálních zahrnuje širší spektrum vozidel, tudíž zde najdeme i námi použitá vozidla pro tento test. Databáze modelů grafických je však omezenější a tato vozidla neobsahuje. Proto byla obě vozidla nahrazena podobnými typy vozidel z řad značky Toyota. Vozidlo Toyota Aygo vozidlem Toyota Corolla a vozidla Toyota Auris vozidel Toyota Opa.

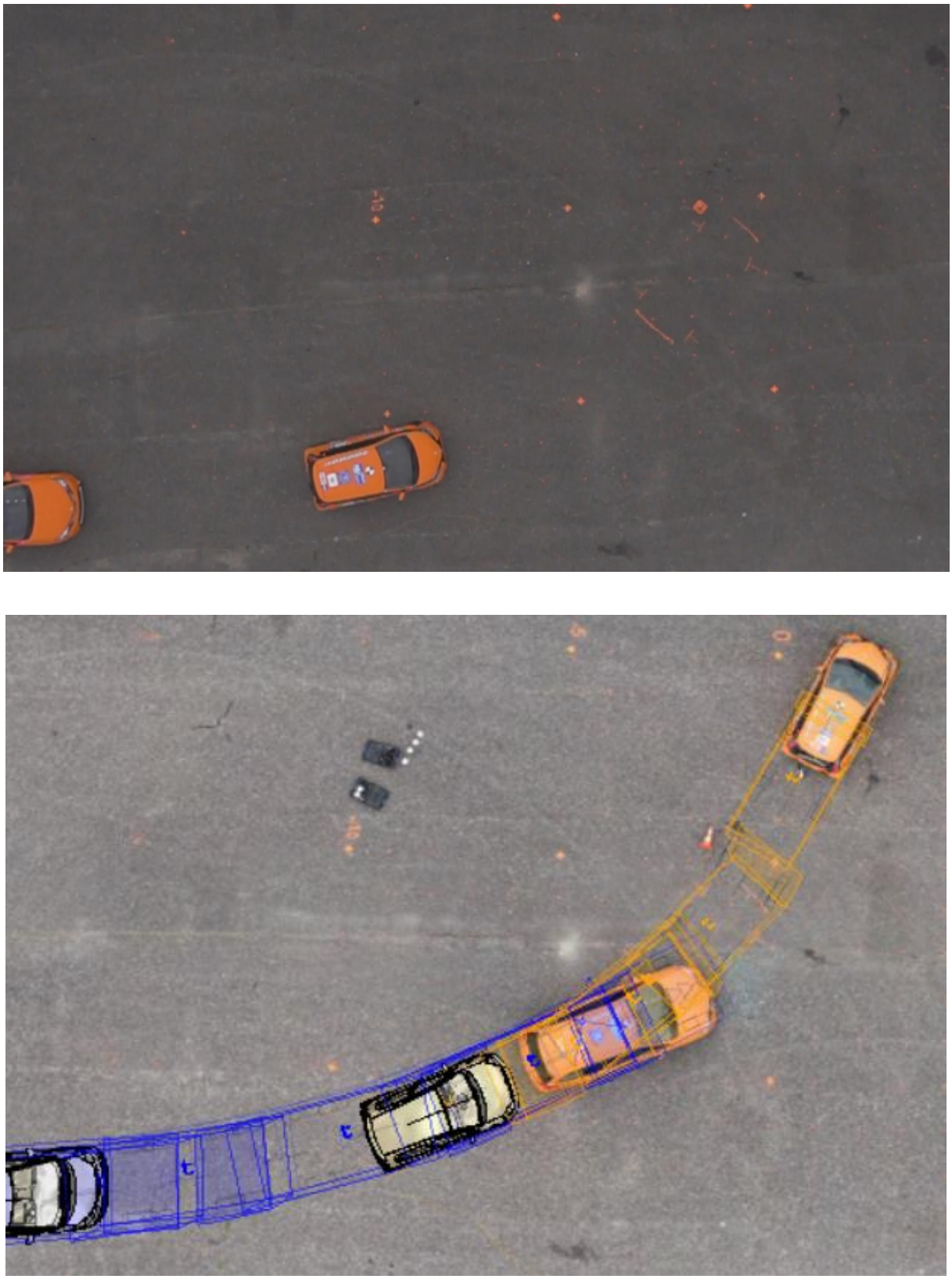


Obrázek 56 - vozidla při prvním kontaktu 2D pohled



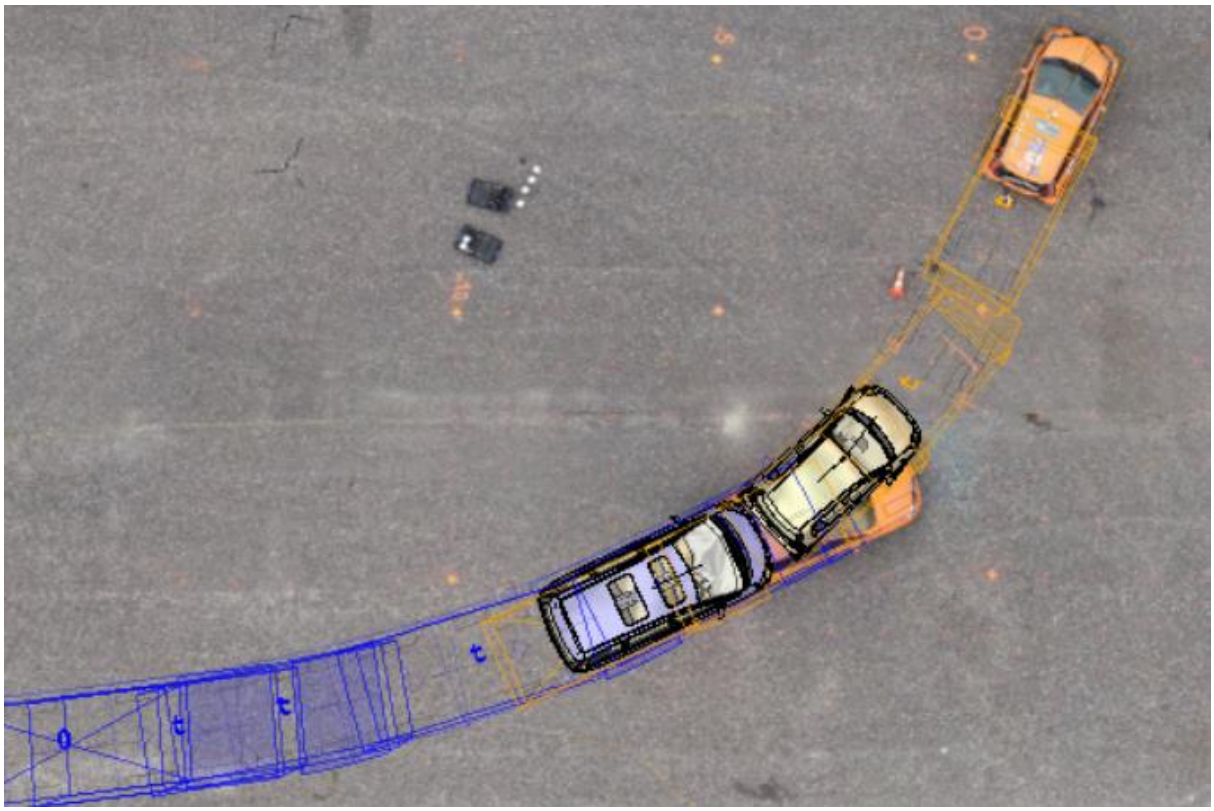
Obrázek 57 - vozidla při prvním kontaktu 3D pohled

6.2.2 Test 2 - pohyb vozidel do konečných poloh



Obrázek 58 - vozidla v počátku nehodového děje, Toyota Auris jedoucí v přímém směru rychlostí 30 km/h, vozidlo Toyota Aygo v po poočátku oblouku jedoucíí 26 km/h

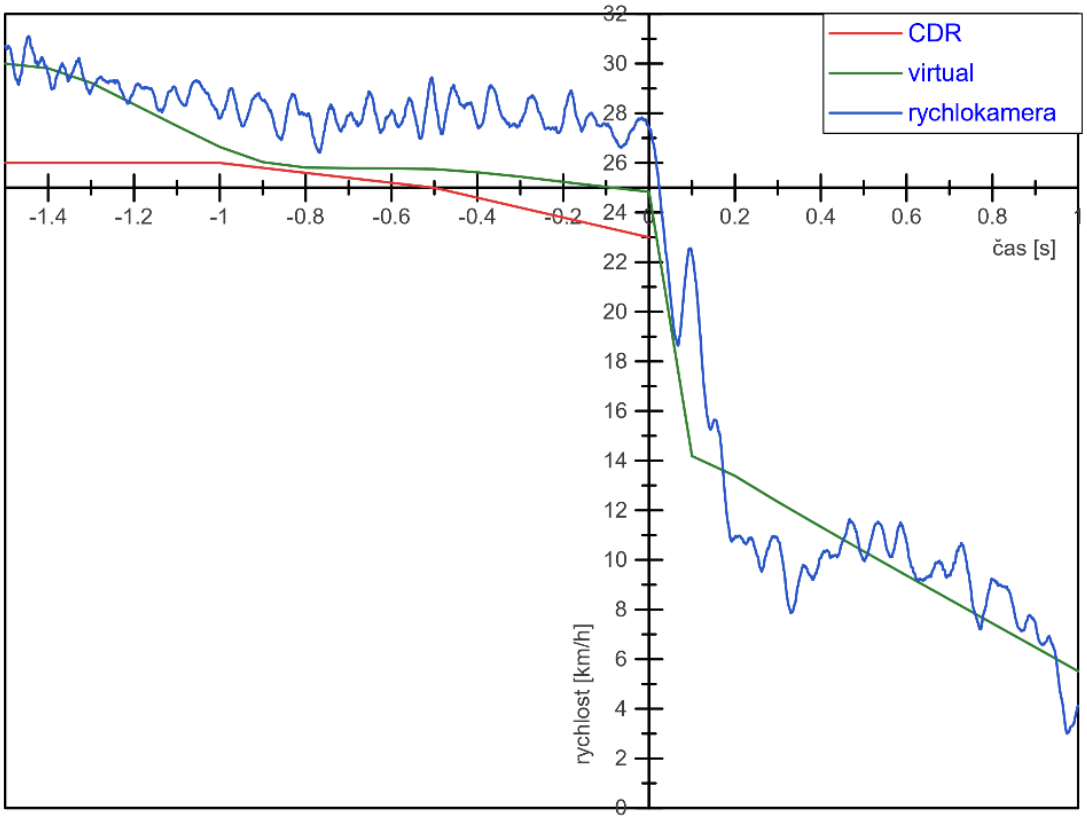
Obrázek 59 - poloha vozidel v okamžiku zastavení vozidla Aygo



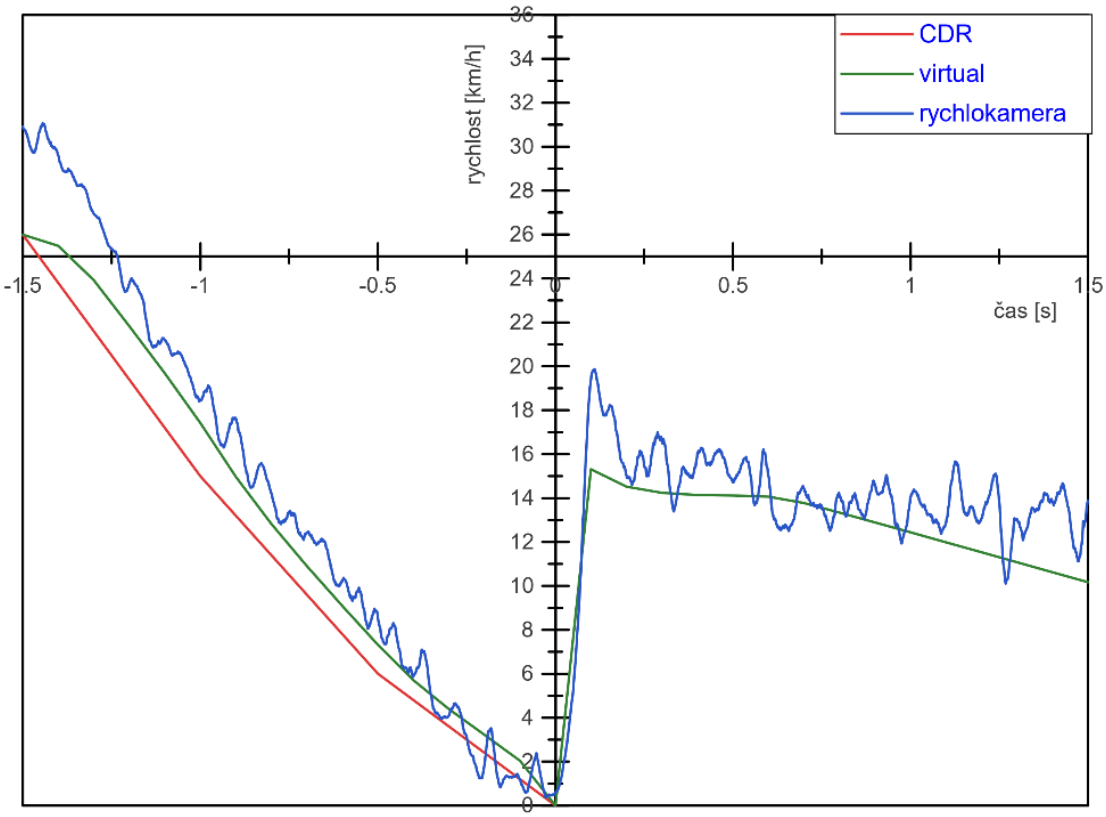
Obrázek 60 - vozidla v okamžik prvního kontaktu

Obrázek 61 - vozidla v konečných polohách

6.2.3 Srovnání průběhu rychlostí vozidel test 2



Obrázek 62 - Průběh rychlosti Toyota Auris



Obrázek 63 - Průběh rychlosti vozidla Aygo

6.2.4 Komentář k výsledkům simulace testu 2

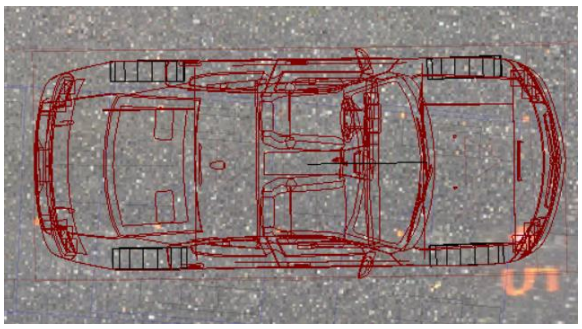
Vozidla byla z počátečních poloh úspěšně nasměrována do poloh konečných, a tak lze konstatovat, že data ohledně předstřetových rychlostí vyčtených ze zařízení CDR by v tomto případě mohla být použita při analýze nehodového děje. Data ohledně natočení volantu, však nemusí být vždy použitelná. Jednak z důvodu komplikovaného převodu na natočení kol a jednak z důvodu nízké vzorkovací frekvence. Protokol CDR zaznamenává totiž pouze v intervalu 0,5 s, což je pro průběh rychlosti dostačující, ovšem pro natočení volantu může představovat problém, jelikož se jedná o dost dlouhou časovou mezeru pro to, aby řidič stihl provést s volantem rychlý manévr, který však nebude systém EDR sto zaznamenat a systém CDR poté vyčíst. Neúplně čisté překrytí modelu vozidel s vozidly na bitmapovém podkladu je způsobeno kmitáním dronu dokumentujícího průběh nehody kamerou, z jejíž záznamu byly bitmapové podklady získány.

Při porovnání průběhu postřetových rychlostí vyprodukovaných výpočtem programu Virtual CRASH a průběhu těchto rychlostí získaných trackováním rychlokamerového záznamu, je patrný srovnatelný průběh. Hodnoty z trackování kmitají, ovšem právě kolem průběhu hodnot vypočtených programem Virtual CRASH. Maximální odchylka je cca 4 km/h, což je pro soudně znaleckou praxi odchylka stále akceptovatelná, a tak lze výpočet považovat za validovaný.

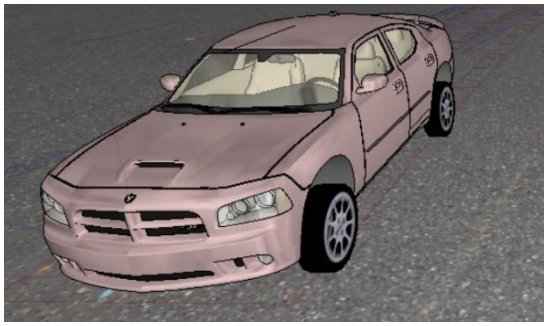
6.2.5 Test 3 – postup tvorby simulace

Zde byl postup zprvu výrazně jednodušší nežli u předchozího případu. Jednak z toho důvodu, že vozidlo Toyota Aygo nebylo před nárazem v pohybu, jednak protože předstřetový pohyb vozidla Dodge Caliber byl přímočarý. Tudíž nebylo třeba zohledňovat údaje o natočení volantu před střetem, a ani hledat okamžik vzájemné polohy vozidel v určitém konkrétním čase před střetem, ale pouze byla vozidlu Dodge Caliber přidána počáteční rychlost 43 km/h, která byla postupně v sekvencích měněna vkládáním zrychlení v určitých časových úsecích dle tabulky v protokolu CDR. Do bodu, ve kterém dosáhlo vozidlo nárazové rychlosti 49 km/h bylo s překrytím 15 cm (odměřeno z fotografie) vloženo vozidlo Toyota Aygo. Dále pak bylo vloženo také vozidlo Ford Transit společně s betonovou překážkou. Jako bitmapový podklad posloužila fotografie z ptačí perspektivy pořízena pomocí dronu zachycujícího oba půdorysy testovaných vozidel v konečných polohách společně s půdorysy vozidla Ford Transit a betonové překážky. Do těchto poloh byla pak vozidla po střetu směrována, tak aby bylo obdobně jako u předchozího testu prokazatelné, že je na základě předstřetových dat fyzicky možné, aby se vozidla dostala do svých konečných poloh. Rovněž tak bylo využito rychlokamerového záznamu k zjištění reálných postřetových rychlostí, které byly s těmi programem vypočtenými graficky srovnány. Vozidlo

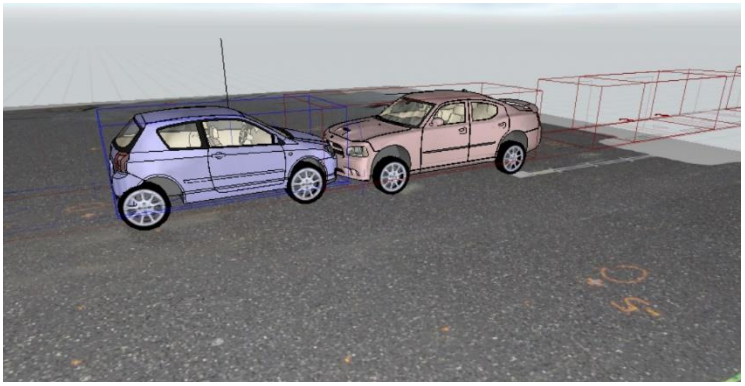
Dodge Caliber bylo v 3D modelu nahrazeno vozidlem Dodge Charger. Vozidlo Toyota Aygo vozidlem Toyota Corolla stejně jako v simulaci předchozí.



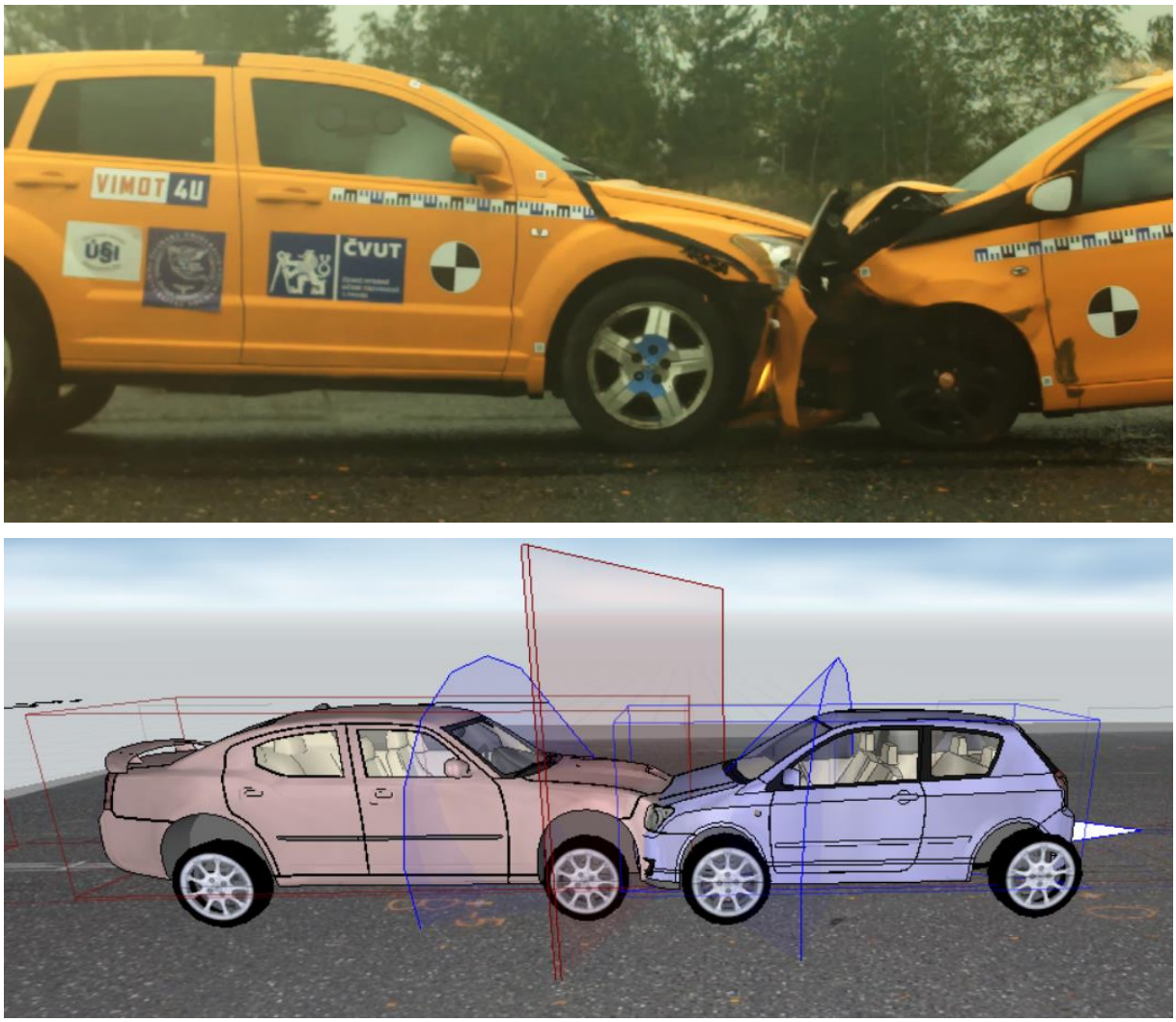
Obrázek 64 - fyzikální 2D model vozidla Dodge Caliber



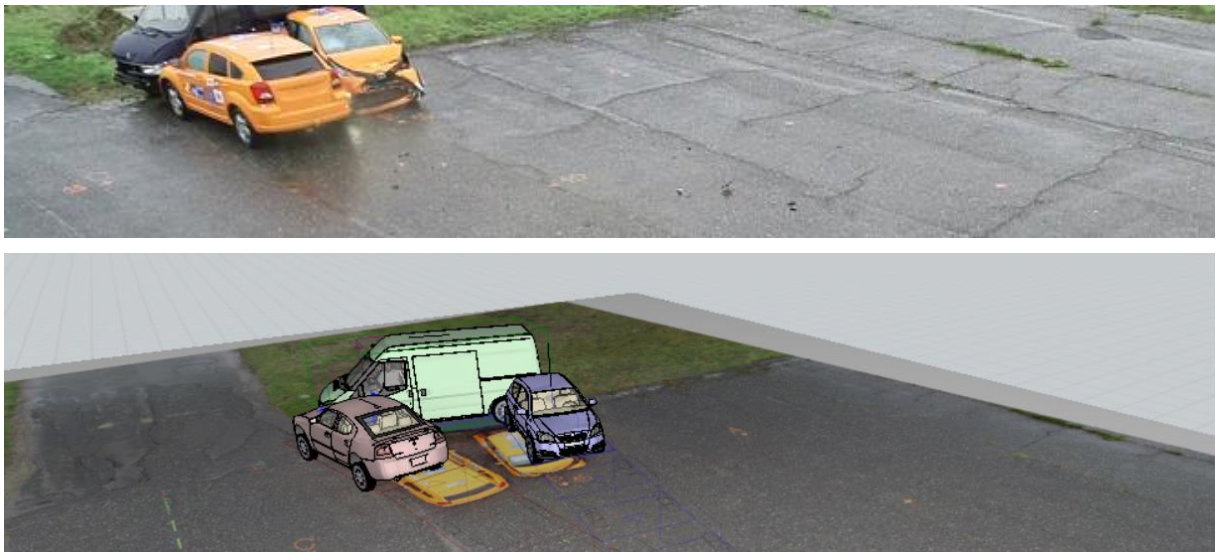
Obrázek 65 - 3D model vozidla Dodge Charger nahrazujícího vozidlo Dodge Caliber



Obrázek 66 - střetová konfigurace vozidel

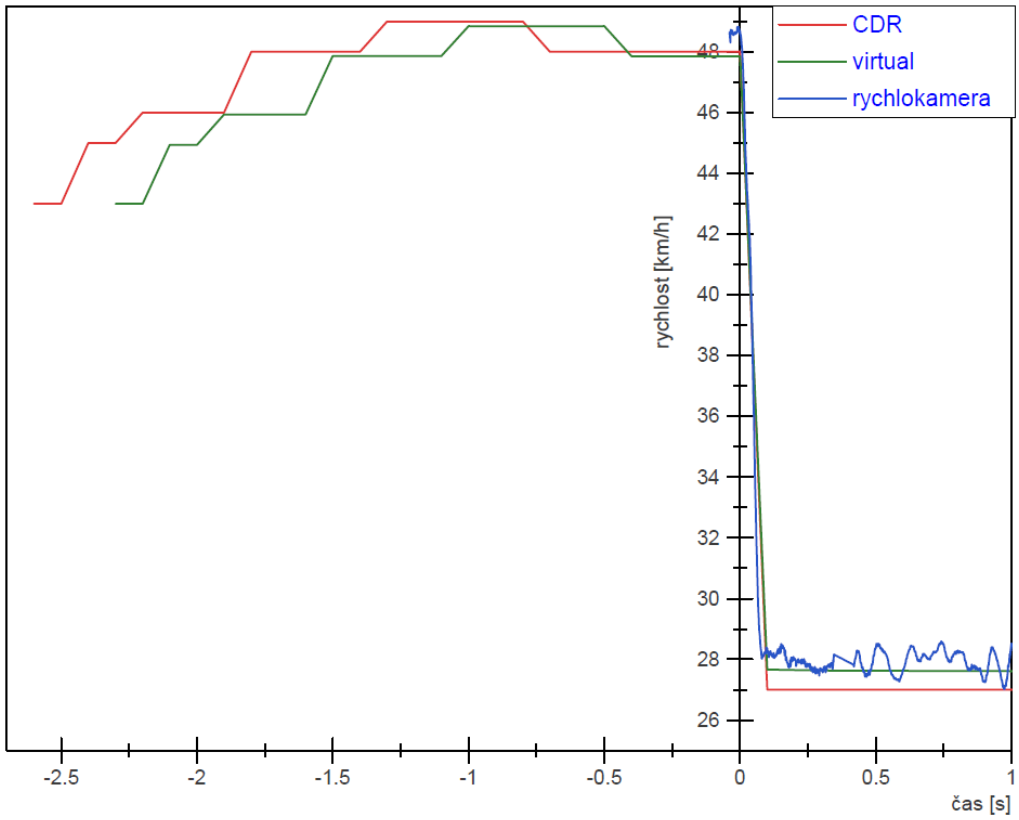


Obrázek 67 - vozidla 0,1 s po střetu, vozidlo Dodge Caliber zpomaleno na 27 km/h, vozidlo Toyota Aygo zrychleno na 37 km/h

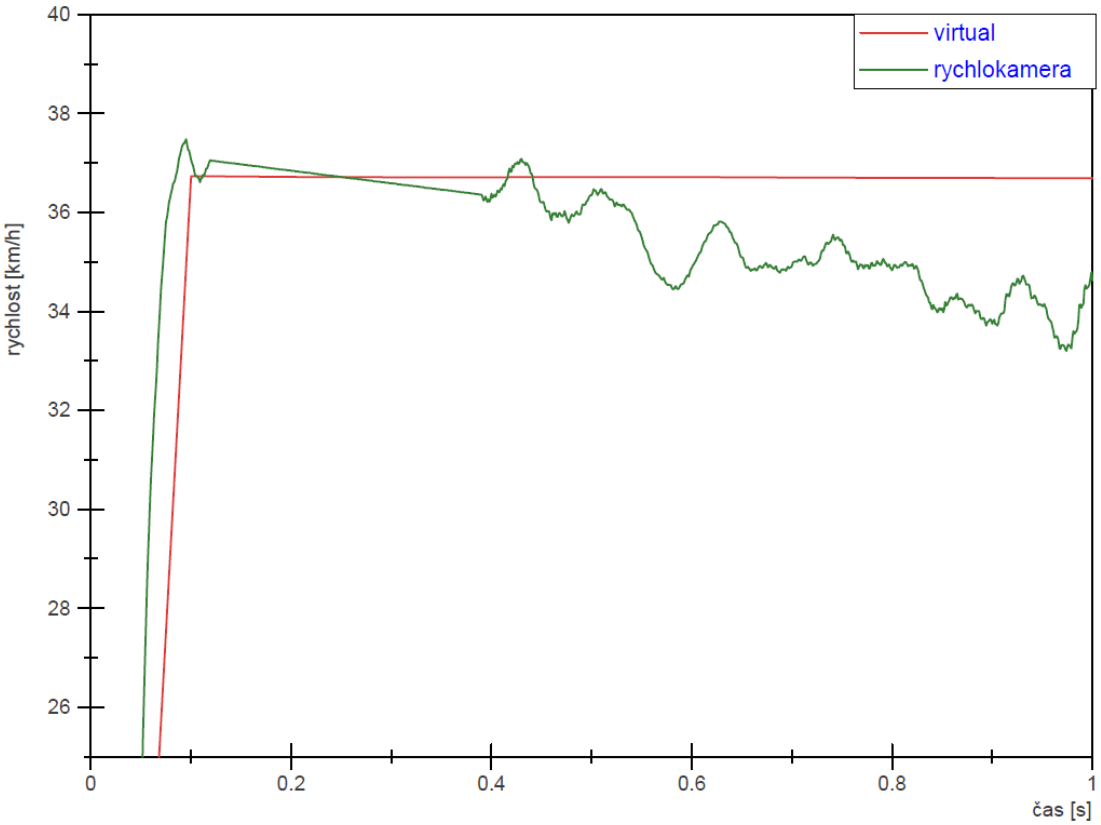


Obrázek 68 - pohled na konečné polohy vozidel

6.2.6 Srovnání rychlostí vozidel – test 3



Obrázek 69 - průběh rychlosti vozidla Dodge Caliber



Obrázek 70 - průběh rychlosti vozidla Toyota Aygo

6.2.7 Komentář k výsledku simulace testu 3

Výsledek simulace je méně uspokojivý než u předchozího testu. Vozidla se podařilo dostat do konečných poloh pouze částečně. Za hlavní důvod lze pokládat velmi komplikované vytvoření modelu betonové bariéry a její přilehnutí k vozidlu Ford Transit, tak aby po nárazu vozidel do něj došlo k jeho natočení a následnému odrazu vozidel přesně do skutečných konečných poloh. Za podstatné lze však označit fakt, že se modely vozidel po vzájemné srážce pohybovaly dle simulace po shodné trajektorii jako vozidla v realitě a rovněž tak narazila do vozidla Ford Transit v odpovídající okamžiky do odpovídajících částí tohoto vozidla. Nejdříve vozidlo Toyota Aygo do zadní levé poloviny vozidla Ford Transit, čímž došlo k lehkému pootočení vozidla Ford Transit kolem osy betonové bariéry, poté došlo k nárazu vozidla Dodge Caliber do levé boční části přední poloviny vozidla, čímž se vozidlo Ford Transit natočilo zpět opačným směrem, principem páky pak bylo vozidlo Toyota Aygo odraženo lehce zpět, směrem proti pohybu před nárazem.

U průběhu postřetových rychlostí vozidla Dodge Caliber je patrná jasná shoda u všech zdrojů. Odpovídají si vzájemně všechna data, jak z výpočtu programu Virtual CRASH, tak z CDR, tak z rychlokamery. Odchylka je pouze cca 1 km/h, což lze při případných výpočtech zpětné analýzy nehodového děje považovat z toleranci vyhovující.

U postřetových rychlostí vozidla Toyota Aygo jsou referenční data ohledně rychlosti dostupná pouze z rychlokamery, jelikož zařízení CDR poskytuje v tomto případě pouze prvních 20 milisekund, což je pro analýzu příliš krátký okamžik. Při srovnání vyobrazených průběhů, je viditelná silná shoda v prvních čtyřech desetinách sekundy, poté je však bohužel rychlokamerový průběh rychlosti rozkmitán a dosahuje odchylky až 2 km/h, jedná se však spíše o vadu disperze obrazu při trackování, nežli vadnému výpočtu programu Virtual CRASH. Výpočet lze tedy označit i v tomto případě za vyhovující.

7 Závěr

Cílem této práce bylo měření, zpracování a posouzení vhodnosti a spolehlivosti elektronických nehodových dat z pro účely soudního znalectví v dopravě. V teoretické části byla nastíněna problematika znalecké činnosti, její smysl a rozsah. Byly zmíněny základní fyzikální principy, se kterými tento obor pracuje, a také metody, které používá pro výpočet analýzy nehodového děje. Podstatná vazba tohoto inženýrského odvětví je na provádění nárazových zkoušek, ze kterých je možné čerpat cenná data sloužící jako zdroj údajů například ohledně chování odlišných karoserií při různých typech nárazu. Z nich lze zpětně vyvozovat nárazové rychlosti, které pak slouží jako podstatné vstupní veličiny pro analýzu nehody.

Dnešní elektronické systémy ve vozidlech se však ukázaly rovněž jako zajímavý zdroj, mající potenciál rozšířit možnosti rekonstrukce nehodového děje. Mezi ně patří systém EDR (Event Data Recorder), který je součástí řídící jednotky vozidla a ukládá primárně zápis ohledně zrychlení bezprostředně před a po nárazu vozidla. V minulosti si automobilové společnosti nechávaly tyto data pouze pro své interní účely, později však došlo k uvědomění si jejich významnosti a dnes je snaha evropských institucí o plošné umožnění vyčítání těchto dat při dokumentaci a vyšetřování dopravních nehod. K tomuto se používá zařízení zvané CDR (Crash Data Retrieval), poskytující přehledné protokoly ohledně systémových veličin změřených a uložených systémem EDR při nárazu vozidla.

Předmětem praktické části této práce byla verifikace a validace těchto dat pro analýzu dopravních nehod. Bylo vykonáno několik reálných nárazových testů při různých konfiguracích střetu s vozidly vybavenými těmito systémy. Mimo to však bylo do vozidel implementováno i referenční měřící zařízení vyvinuté společností Krypton. Jedná se o datovou ústřednu, která poskytuje několik kanálu umožňujících napojení široké škály elektrických senzorů. Pro účely těchto nárazových testů byly použity vysokofrekvenční akcelerometry, které jsou schopné s adekvátní přesností a spolehlivostí kontinuálně měřit data ohledně zrychlení i v takto extrémních podmínkách. Tato data bylo pak možné srovnávat s daty poskytnutými zařízením CDR a tím posuzovat jejich správnost a kvalitu. Po této komparaci lze konstatovat, že data si svým vzájemným průběhem odpovídají. Lze však v některých případech nalézt mírné nesrovnalosti způsobené zejména odlišným umístěním senzorů řídící jednotky a senzorů referenčního zařízení vzhledem k těžišti vozidla či odlišnou vzorkovací frekvencí, která může způsobit zastínění okamžiků dosažení extrémních hodnot zrychlení.

V druhé fázi praktické části byla zkoumána samotná užitečnost elektronických nehodových dat. K tomu byl využit software Virtual Crash sloužící pro simulace dopravních nehod. Do jeho prostředí

byla vložena vozidla z dvou vybraných testů a na základě předstřetových dat ze zařízení CDR byla vytvořena simulace ukazující, zda je technicky možné, aby se vozidla dostala do svých konečných poloh, jako po jejich reálném střetu. Mimo to byl také srovnán průběh reálných rychlostí vozidel po střetu s rychlostmi vypočtenými programem Virtual Crash. Dle výsledku obou simulací lze konstatovat, že je fyzicky možné, aby se vozidla na základě předstřetových dat získaných vyčtením zařízením CDR dostala do svých konečných poloh při odpovídajících rychlostech. Na základě těchto poznatků by šla data z těchto systému považovat za významnou složku spolehlivě napomáhající při analýze dopravních nehod.

8 Zdroje

[1] NOON, Randall. Forensic engineering investigation. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. ISBN 0849309115.

[2] BRADÁČ, Albert. Soudní znalectví ve vybraných technických a ekonomických oborech. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2018. ISBN 978-80-7204-995-0.

[3] NOON, Randall. Introduction to forensic engineering. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1992. ISBN 0849381029.

[4] ŠACHL, Jindřich. Analýza nehod v silničním provozu. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 144s

[5] CARPER, L. Kenneth Forensic engineering, 2. vyd., Boca Raton CRC Press, 2000, ISBN 0-8493-7484-7,

[6] Crash Data Retrieval; Bosch Diagnostics; http://www.boschdiagnostics.com/testequipment/cdr/Pages/CDRHome.aspx

[7] DaSilva MP; Analysis of Event Data Recorder Data for Vehicle Safety Improvement; Report No. DOT HS 810 935; NHTSA; Washington, DC; April, 2008

[8] RÁBEK, Vlastimil. Vybrané postupy analýzy dopravních nehod: (sborník převzatých cizojazyčných publikací) = Ausgewählte Fälle in der Verkehrsunfallrekonstruktion : (Sammelbuch übernommener fremdsprachigen Veröffentlichungen). Olomouc: Vlastimil Rábek, 2009. ISBN 978-80-554-0033-4.

[9] COMEAU J-L, German A and Floyd D; Comparison of Crash Pulse Data from Motor Vehicle Event Data Recorders and Laboratory Instrumentation; Proc. CMRSC-XIV; Ottawa, ON; 2004

[10] Dainius J. DALMOTAS Alan GERMAN D. J. Dalmotas Consulting, Inc., Crash pulse analysis using event data recorders, Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference, Saskatoon, Saskatchewan, June 8-10, 2009

[11] SZTWIERTNIA K, GUZEK M. Uncertainty of determining the energy equivalent speed (EES) of a vehicle collision by the experimental and analytical method. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 76(2): 123-136, http://dx.doi.org/1014669/AM.VOL76.ART7

[12] Crashtesty pomáhají odhalit důvod nehody i pojistné podvody - Nápady a objevy – Zprávy z VUT. Zprávy z VUT [online]. Dostupné z: https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/crashtesty-pomahaji-odhalit-duvod-nehody-i-pojistne-podvody-d108063

[13] MIKULÁŠKOVÁ L. Diplomová práce: Analýza naměřených dat z nárazových zkoušek - čelní střety [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148767, Ing. Albert Bradáč, Ph.D.

[14] CAMPBELL, K. L. Energy Basis for Collision Severity. Warrendale: SAE International, 1974. DOI: 10.4271/74056

[15] Euro NCAP.euroncap.com.Safety campaigns. [online].© 2020 Euro NCAP. Dostupné z: https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/

[16] IIHS. iihs.org.. About us. [online]. ©1996-2020, Insurance Institute for Highway Safety, Highway Loss Data Institute. Dostupné z:https://m.iihs.org/mobile/aboutus

[17] ROGER SAUL and collective; Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems – II; National Highway Traffic Safety Administration Vehicle Research & Test Center (VRTC), November 1999

[18] Reconstruction of 60º Front-to-Side Staged Collisions with the Virtual CRASH Software Application BOB SCURLOCK, Ph.D., ACTAR, University of Florida

[19] Prezentace výsledků z čelní nárazové zkoušky s malým překrytím; TOMÁŠ COUFAL, MAREK SEMELA, ExFoS - Expert Forensic Science XXIV. mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství Brno 2015

[20] GABOR MELEGH, Simulation study of pedestrian impact and throw-distance, Copyright © 2007 AutoExpert Hungary, Inc..

[21] William T. C. Neale, David Hessel, Daniel Koch, Determining Position and Speed through Pixel Tracking and 2D Coordinate, Transformation in a 3D Environment; Kineticorp, LLC.; Copyright © 2016 SAE International

Seznam obrázků

Obrázek 1 - ukázka plánku nehody 15

Obrázek 2 - využití totální stanice pro polohovou dokumentaci nehod policisty 15

Obrázek 3 - tvorba 3D modelu pomocí letecké fotogrammetrie 16

Obrázek 4 - rychlostní trojúhelníky 18

Obrázek 5 - diagram hybnosti 18

Obrázek 6 - model vozidla pro výpočet energie deformace 24

Obrázek 7 - srovnání metod výpočtu EES 25

Obrázek 8 IIHS test středního překrytí 26

Obrázek 9 - IIHS test malého překrytí na straně řidiče 27

Obrázek 10 - IIHS test malého překrytí na straně spolujezdce 28

Obrázek 11 - Euro NCAP test plného překrytí 29

Obrázek 12 - Euro NCAP test částečného překrytí 29

Obrázek 13 - Euro NCAP boční náraz 30

Obrázek 14 - IIHS boční náraz 31

Obrázek 15 - ilustrace procese zisku nehodových dat – atecea.ie 32

Obrázek 16 - ukázka časového odstupu měření při nárazech 34

Obrázek 17 - graf srovníní průběhu delty v u laboratorního testu nárazu do pevné bariéry a průběhu delty v u obdobné reálné nehody 34

Obrázek 18 - graf srovnání průběhu delty v u laboratorního testu nárazu do deformovatelné bariéry a průběhu delty *v* u obdobné reálné nehody 35

Obrázek 19 - Ilustrativní zapojení a upevnění referenční soustavy 40

Obrázek 20 - lustrační fotografie figurín Hybrid III 41

Obrázek 21 - Uložení zařízení ve vozidle Toyota RAV během testu s převrácením vozidla 41

Obrázek 22 - Vozidlo Toyota Aygo zadní část 43

Obrázek 23 - Vozidlo Toyota Aygo – přední část. 43

Obrázek 24 - Vozidlo Toyota Auris zadní část 44

Obrázek 25 - Vozidlo Toyota Auris přední část 44

Obrázek 26 - Vozidlo Dodge Caliber z boku 45

Obrázek 27 - fotografie místa z ptačí perspektivy. 47

Obrázek 28 - test 1 konečná poloha vozidel 48

Obrázek 29 – test 1 poškození vozidla Toyota Aygo 48

Obrázek 30 - test 1 poškození vozidla Toyota Aygo 49

Obrázek 31 – test 2 konečná poloha vozidel 50

Obrázek 32 – test 2 deformace vozidel Toyota Aygo a Toyota Auris 50

Obrázek 33 - test 3 konečné polohy vozidel 51

Obrázek 34 - deformace vozidla Toyota Auris po testu 3 51

Obrázek 35 - deformace vozidla Dodge po testu 3 52

Obrázek 36 - Sloučené ortofoto s GSD 1cm/px a výstupy z totální stanice zobrazující počáteční polohu vozidla Auris a konečné polohy vozidel po střetu 53

Obrázek 37 Polodetail a detailní poškození vozidel – test 4 53

Obrázek 38 - Ukázka neupravené (červená) a filtrované datové řady (modrá) 55

Obrázek 39 - Ukázka zaměření totální stanicí (test 4 roku 2017, výchozí i konečné polohy) 56

Obrázek 40 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 1) 58

Obrázek 41 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo 59

Obrázek 42 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 2) 60

Obrázek 43 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo (test 2) 61

Obrázek 44 - Průběh hodnot zrychlení dle CDR u vozidla Dodge Caliber (test 3) 62

Obrázek 45 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Aygo (test 3) 63

Obrázek 46 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Volvo V60 (test 4) 64

Obrázek 47 - Porovnání hodnot zrychlení dle CDR a referenčního zařízení Krypton u vozidla Toyota Auris (test 4) 65

Obrázek 48 - kinematické parametry 67

Obrázek 49 - dynamické parametry vozidla 67

Obrázek 50 - příklad diagramu závislosti dráhy na čase 68

Obrázek 51 - ukázka protokolu 68

Obrázek 52 – 3D Model Toyoty Opa nahrazující Toyotu Auris v prostředí programu Virtual CRASH .. 69

Obrázek 53 - fyzikální 2D model Toyoty Auris v prostředí programu Virtual CRASH 69

Obrázek 54 – 3D Model Toyoty Corolla nahrazující Toyotu Aygo v prostředí programu Virtual CRASH 69

Obrázek 55 - fyzikální 2D model vozidla Toyota Aygo v prostředí programu Virtual CRASH 69

Obrázek 56 - vozidla při prvním kontaktu 2D pohled 71

Obrázek 57 - vozidla při prvním kontaktu 3D pohled 71

Obrázek 58 - vozidla v počátku nehodového děje, Toyota Auris jedoucí v přímém směru rychlostí 30 km/h, vozidlo Toyota Aygo v po poočátku oblouku jedoucií 26 km/h..... 72

Obrázek 59 - poloha vozidel v okamžiku zastavení vozidla Aygo..... 73

Obrázek 60 - vozidla v okamžik prvního kontaktu 74

Obrázek 61 - vozidla v konečných polohách 75

Obrázek 62 - Průběh rychlosti Toyota Auris..... 76

Obrázek 63 - Průběh rychlosti vozidla Aygo..... 76

Obrázek 64 - fyzikální 2D model vozidla Dodge Caliber..... 78

Obrázek 65 - 3D model vozidla Dodge Charger nahrazujícího vozidlo Dodge Caliber..... 78

Obrázek 66 - střetová konfigurace vozidel..... 78

Obrázek 67 - vozidla 0,1 s po střetu, vozidlo Dodge Caliber zpomaleno na 27 km/h, vozidlo Toyota Aygo zrychleno na 37 km/h..... 79

Obrázek 68 - pohled na konečné polohy vozidel 79

Obrázek 69 - průběh rychlosti vozidla Dodge Caliber 80

Obrázek 70 - průběh rychlosti vozidla Toyota Aygo..... 80

Seznam příloh

1.1 Video s animací simulace testu 2

1.2 Protokol k simulaci testu 2

1.3 Video s animací simulace testu 3

1.4 Protokol k simulaci testu 3

Všechny přílohy jsou umístěny na přílohovém CD.